
3 1761 04945140 4

GRUNDZÜGE

DER

LEHRE VOM LICHTSINN

VON

EWALD HERING †

PROFESSOR IN LEIPZIG

MIT 77 TEXTFIGUREN UND 3 TAFELN



BERLIN
VERLAG VON JULIUS SPRINGER
1920

Sonderabdruck aus dem Handbuch der Augenheilkunde
I. Teil XII. Kapitel.

Inhaltsverzeichnis.

I. Abschnitt.

Vom Wesen der Farben.

§ 1. Die Farben als der Stoff der Sehdinge. Wenn wir im beleuchteten Raume die Augen aufschlagen, sehen wir vor uns eine Mannigfaltigkeit räumlich ausgedehnter Gebilde, die sich durch die Verschiedenheit ihrer Farbe voneinander abgrenzen oder abheben, wobei das Wort Farbe im weitesten Sinne genommen und auch Schwarz, Grau, Weiß, überhaupt jedes Dunkel und jedes Hell darunter verstanden ist. Die Farben sind es, welche die Umrisse jener Gebilde ausfüllen, sie sind der Stoff, aus dem das unserem Auge Erscheinende sich vor uns aufbaut; unsere Sehwelt besteht lediglich aus verschieden gestalteten Farben, und die Dinge, so wie wir sie sehen, d. h. die Sehdinge, sind nichts anderes als Farben verchiedener Art und Form.

Die ganze Sehwelt mit ihrem Inhalt ist ein Geschöpf unseres inneren Auges, wie wir das nervöse Sehorgan (Netzhaut, Sehnerv und die bezüglichen Hirnteile) nennen können, im Gegensatze zu dem dioptrischen Apparat als dem äußeren Auge. Das schöpferische Vermögen unseres inneren Auges schafft jene Farbengebilde unter dem Zwange der Anregungen, welche es durch die von den wirklichen Außendingen in unser Auge geschickten Strahlungen erhält. Die im Neuroepithel der Doppelnetzhaut, als dem Empfangsorgane (Empfänger) des inneren Auges, von den wirklichen Dingen entworfenen Bilder einerseits, und andererseits der ganze Reichtum von Erfahrungen, welche wir über unsere Außenwelt gesammelt und welche dauernde Spuren in der nervösen Substanz des inneren Auges zurückgelassen haben, bestimmen die Thätigkeit des unsere jeweilige Sehwelt aufbauenden inneren Auges.

Die strenge Unterscheidung zwischen den Sehdingen als Farbengebilden und den wirklichen Dingen, zwischen der aus Farben aufgebauten Sehwelt und der wirklichen Welt ist eine unerlässliche Vorbedingung für das Verständnis des Sehaktes und seiner Gesetze. Inwiefern den Dingen, die wir uns auf Grund unserer gesamten sinnlichen Erfahrungen als die wirk-

lichen denken und als solche zu bezeichnen pflegen, abgesehen von diesem ihren Vorhandensein in unserem Denken ein von dem letzteren unabhängiges Bestehen zukommt, ist eine Frage, von deren Beantwortung die begriffliche Unterscheidung der Sehdinge von den wirklichen Dingen und eines Sehraumes von einem wirklichen Raume ganz unabhängig ist.

Von den Formen, in welchen die Farben uns im Sehraume erscheinen, also von den räumlichen Eigenschaften der Farben, handelt die Lehre vom Raumsinne des Auges, von den Farben selbst aber als den verschiedenen Qualitäten des Inhaltes oder Stoffes der Sehdinge handelt die Lehre vom Lichtsinne, welche uns hier zu beschäftigen hat.

§ 2. Die Farben als Sehqualitäten. Der Ungelehrte nimmt das Grün eines Baumblattes ohne weiteres für eine Eigenschaft des Blattes. Der physikalisch Unterrichtete weiß jedoch, dass er dasselbe Blatt in einer ganz anderen Farbe sehen könnte, wenn es nicht vom gewöhnlichen Tageslichte, sondern von einer andersartigen Lichtquelle beleuchtet wäre und daher auch eine andersgeartete Strahlung in sein Auge zurückwerfen würde. Weil ihm die Farbe an die Beschaffenheit des ins Auge gelangenden Lichtes gebunden scheint, betrachtet er das Grün als eine Eigenschaft nicht des Blattes, sondern der vom Blatte zurückgeworfenen Strahlung, und nennt die letztere grün.

Der physiologisch Unterrichtete geht weiter. Er weiß, dass er dasselbe Blatt, welches er, wenn es sich auf dem mittlen Teile seiner Netzhaut abbildet, grün sieht, auch gelb bezw. grau sehen kann, wenn sein Bild auf hinreichend excentrische Netzhautstellen fällt; und schon aus dieser einzigen Thatsache würde er schließen können, dass das Grün nicht eigentlich an die vom Blatte ins Auge geschickte Strahlung gebunden ist, sondern vielmehr an unser Sehorgan, welches das Vermögen besitzt, uns Grün oder Gelb oder Grau sehen zu lassen, je nachdem die von dem Blatte kommende Strahlung diese oder jene Netzhautstelle trifft. Er weiß ferner, dass, wenn er einen Punkt des auf weißes Papier gelegten Blattes einige Zeit unverrückten Blickes betrachtet und dann das Blatt wegnimmt, auf dem Papiere ein rotes bezw. blaurotes Blatt, das sogenannte Nachbild des Blattes, erscheinen kann, obwohl die bezügliche Stelle des Papieres ganz dieselbe Strahlung in sein Auge schickt, wie das übrige weiß erscheinende Papier. Es ist ihm ferner bekannt, dass er nach längerem Fixieren des Blattes ein rotes Nachbild desselben auch dann noch sehen kann, wenn er sein Auge schließt und verdeckt, dass also die Farbe nicht bloß während der Wirkung eines Lichtes auf die Netzhaut, sondern auch bei Mangel jeder Strahlung von unserem inneren Auge erzeugt werden kann. Mit demselben Rechte also, mit welchem dem Laien das Grün als eine Eigenschaft des Blattes, dem Physiker als eine Eigenschaft der von dem Blatte aus-

gehenden Strahlung gilt, darf es dem Physiologen als eine Eigenschaft des von dieser Strahlung im Sehorgan hervorgerufenen physiologischen Vorganges gelten, und er könnte von einer grünen Regung der nervösen Substanz sprechen, wie der Physiker von grünen Strahlen und der Laie von grünen Außendingen spricht.

Für den Psychologen endlich ist das Grün weder eine Eigenschaft des Blattes, noch der Strahlung, noch der Regung des inneren Auges, sondern vielmehr ein psychisches Phänomen, ein Bewusstseinsinhalt bestimmter Qualität. Er lässt dasselbe zwar verbunden sein mit einem bestimmten nervösen Prozess, aber er unterscheidet zwischen diesem als dem hinzu gedachten physischen Korrelate des psychischen Phänomens und dem Phänomen selbst. Wenn er von einem grünen Blatte, von einer grünen Strahlung, einer grünen Regung des inneren Auges spricht, so ist er sich bewusst, dass er dies nur etwa mit demselben Rechte thun darf, mit welchem man von einem Weinstock, einer Weintraube, einer Weinflasche spricht. Wie das Getränk Wein kein gemeinsamer Bestandteil des Stockes, der Traube, der Flasche ist, so ist auch das Grün keine gemeinsame Eigenschaft des Blattes, der Strahlung und der nervösen Regung. Wir pflegen eben Dingen oder Vorgängen, welche in einem genetischen oder auch nur ganz äußerlichen Zusammenhange stehen, sehr häufig dasselbe Beiwort zu geben.

Wir haben demnach streng zu unterscheiden zwischen den Farben als Sehqualitäten oder sogenannten psychischen Phänomenen und den näheren oder entfernteren physischen Bedingungen oder Veranlassungen dieser Phänomene, und wir dürfen nie vergessen, dass das Auftreten einer Farbe zunächst geknüpft erscheint an bestimmte Regungen des inneren Auges, welche ihrerseits durch ins äußere Auge fallende Strahlungen veranlasst, aber auch ohne solche aus ganz anderen, inneren Ursachen erweckt werden können.

So oft ich im folgenden von Schwarz, Weiß, Grün u. s. w., überhaupt von Farben schlechtweg spreche, meine ich damit lediglich die bezügliche Sehqualität, nicht aber eine Strahlung oder einen Farbstoff. Ich werde jedoch kein Bedenken tragen, von weißem Papier, rotem Glase u. s. w. zu sprechen, womit immer gesagt sein soll, dass es sich um ein Papier bezw. ein Glas handelt, welches unter den gewöhnlichsten Bedingungen des Sehens weiß bezw. rot erscheint. Solche Zugeständnisse darf man dem Sprachgebrauche wohl machen. Auch von roten oder blauen Strahlungen darf man sprechen, wenn man darunter solche versteht, die, ins Auge gelangt, in der Mehrzahl der Fälle Rot oder Blau hervorrufen, wenn sie uns auch in anderen Fällen ganz andere Farben veranlassen können. Aber so weit sollte man nicht gehen, wie der große Meister der physiologischen Optik Helmholtz, die optischen Strahlungen selbst als Farben zu

bezeichnen und z. B. von einfachen oder zusammengesetzten Farben da zu sprechen, wo es sich nur um einfache oder zusammengesetzte Strahlungen handelt (1 und 2). Mit demselben Rechte könnte man die Farbstoffe Ultramarinblau und Chromgelb als einfache Farben und ihre grün erscheinende Mischung als eine zusammengesetzte Farbe bezeichnen. Derartiges mag in einem Lehrbuch der Physik bezw. der koloristischen Technik am Platze sein, wäre aber unzweckmäßig in einem Werke über den Farbensinn.

Da Helligkeit ebenso wie Dunkelheit eine Eigenschaft der Farben und nicht der Strahlungen oder der wirklichen Dinge ist, so werde ich auch nicht, wie man noch vielfach thut, die Intensität oder Energie der Strahlungen als Helligkeit bezeichnen, sondern ganz ausschließlich nur den Farben, als den Sehqualitäten, Helligkeit oder Dunkelheit zuschreiben; wenn ich aber von Lichtstärke spreche, hierunter ganz ausschließlich die Energie der Strahlung verstehen, indem ich dabei das Wort Licht in rein physikalischem Sinne nehme. Nach seinem ursprünglichen Sinne bezeichnet dasselbe freilich das Sinnesphänomen und nicht das physikalische Agens, welches die häufigste, wenn auch keineswegs die einzige Veranlassung des Phänomens ist.

Schwarz, Grau, Weiß, welche ich oben ebenfalls als Farben bezeichnet habe, werden gewöhnlich als farblose Gesichtsempfindungen von den Farben im engeren Sinne unterschieden. Wenn wir jedoch die letzteren, nämlich Rot, Gelb, Grün, Blau und ihre Zwischenfarben, also alle Farben von bestimmtem »Farbenton« (Helmholtz) als bunte oder getönte Farben, Weiß und Schwarz aber samt ihren grauen Zwischenstufen als tonfreie oder ungetönte Farben bezeichnen, so könnten wir hier das Wort Empfindung entbehren und alle Qualitäten des Gesichtssinnes mit dem einen Worte Farbe umfassen. Im allgemeinen werde ich dies im folgenden auch thun und nur da, wo dem an die übliche Terminologie gewöhnten Leser ein Missverständnis erwachsen könnte, das Wort Empfindung gebrauchen.

§ 3. Die Farben als sogenannte Empfindungen. Es steht nicht im Einklang mit dem ursprünglichen Sinne des Wortes Empfindung, wenn man die Farben als Empfindungen bezeichnet. Jenem Sinne entspricht es wohl, zu sagen, man empfinde Schmerz, Wollust, Wärme, Kälte, nicht aber, zu sagen, man empfinde Weiß, Rot oder Schwarz. Empfindungen sind im Sinne unserer Sprache etwas, was man in oder an seinem Leibe spürt, die Farben aber erscheinen stets außerhalb unseres Leibes und insbesondere außerhalb unseres Auges. Wenn wir unsere eigene Hand sehen, so erscheint uns ihre Fleischfarbe allerdings an einem Teile unseres Leibes, doch aber außer unserem Auge, und wir sagen nicht, dass wir

ihre Farbe empfinden, sondern dass wir sie sehen. Denn die Hand ist für den sie Sehenden auch nur ein Teil seiner Sehwelt, den er jedoch, weil die Bewegungen der Hand unter seiner unmittelbaren Herrschaft stehen, zu seinem leiblichen Ich rechnet. Für den Neugeborenen aber, dem das erste Mal seine Hand ins Gesichtsfeld kommt, spielt dieselbe als Sehding zunächst dieselbe Rolle wie die Hand eines anderen, neben ihm liegenden Kindes, und er befindet sich zu seiner Hand in einem ähnlichen Verhältnis, wie der junge Hund zu seinem Schwanze, wenn er ihn einmal zufällig sieht und nach demselben als nach etwas nicht zu ihm selbst Gehörigem schnappt.

Soll ich aber im Anschluss an den Sprachgebrauch der Gelehrten die Farben Empfindungen nennen, so muss ich auch, wenn ich eine Kirsche sehe, sagen dürfen, dass ich eine rote rundliche Empfindung habe, und dass der Ort dieser meiner Empfindung außerhalb meines Leibes auf dem gleichzeitig vor mir erscheinenden Baume ist, welcher hier auch nur als Sehding in Betracht kommt (3, S. 345). Den physischen Vorgang, welchen die von der Kirsche in mein Auge gesandte Strahlung in der nervösen Substanz desselben veranlasst, denke ich mir allerdings in meinem Körper. Aber dieser Vorgang ist eben keine Farbe; man kann ihn als das physiologische Korrelat der Farbe bezeichnen, aber nicht selbst Farbe nennen, und welche Vorstellungen immer man sich von diesem Vorgange machen möge, keinenfalls wird selbst der Unkundigste sich denselben rot und rundlich denken wie die Kirsche.

Man hat freilich auch den durch eine Strahlung veranlassten physiologischen Prozess in der Netzhaut bezw. im Sehnerven und Gehirn als Empfindung bezeichnet und z. B., wie dies noch Helmholtz that, von einer Leitung der Empfindung durch den Sehnerven zum Gehirn gesprochen, wie man jetzt von einer Leitung der Erregung spricht. Wenn man sich einmal darüber geeinigt hätte, könnte man freilich den Erregungsvorgang oder, wie ich es vorhin nannte, die physische Regung unseres inneren Auges Empfindung nennen; dann dürfte man aber nicht gleichzeitig auch das Sinnesphänomen, hier also die Farbe, als Empfindung bezeichnen, wenn man Missverständnisse und Unklarheiten ausschließen will.

Um die für uns im Dunkel liegende Entstehungsweise der Gesichtswahrnehmungen hat sich ein ganzer Kreis von Hypothesen gebildet. So sollte z. B. die auf die Netzhaut fallende Strahlung in uns ein Etwas veranlassen, von dem man nicht recht zu sagen wusste, ob es ein Physisches oder ein Psychisches oder beides zugleich sei. Dieses Etwas sollte ursprünglich nicht raumhaft sein, sondern erst infolge der Erfahrung räumliche Eigenschaften gewinnen. Ursprünglich in den Augen oder im Gehirn sitzend sollte dieses Etwas dann in den Außenraum hinaus projiziert werden. Solange es noch in unserm Körper bezw. im Auge war, oder solange es noch keine räumlichen Eigenschaften hatte, sollte es »reine« Empfindung, war es bereits draußen, sollte es Vorstellung beziehungs-

weise Wahrnehmung sein. Das sind Meinungen; Thatsache aber ist, dass uns, soweit unsere Erinnerung zurückreicht, die Farben nie innerhalb unseres Auges erschienen, dessen Bekanntschaft der Mensch überhaupt erst verhältnismäßig spät macht; Thatsache ist ferner, dass unsere Außendinge, insoweit wir sie sehen, lediglich aus Farben bestehen; daher man also entweder aufhören müsste, die Farben als Empfindungen zu bezeichnen, oder wenn man dies thut, auch zugeben müsste, dass sie Empfindungen sind, welche ihren Ort außerhalb unseres Leibes haben.

Will man die Farben entweder wegen ihrer räumlichen Eigenschaften oder weil sie ihren Ort vor uns, nicht in uns und insbesondere nicht dort haben, wo wir unser Auge fühlen oder uns dasselbe denken, Vorstellungen nennen, so ist dies ebenfalls Sache der Übereinkunft. Zweckmäßiger aber scheint es mir, das Wort Vorstellung auf die nicht in sinnlicher Frische und Unmittelbarkeit erscheinenden, sondern nur gedächtnismäßig reproduzierten Farben und Sehdinge zu beschränken.

Offenbar bestand in der Psychologie ein Bedürfnis, für die Farben, aus denen die Sehdinge bestehen, eine Art Urzustand anzunehmen, in welchem sie noch nicht durch die umbildende Hand der Erfahrung gegangen sind, und diesem Rohstoffe einen anderen Namen zu geben, als dem psychisch weiter verarbeiteten; daher man jenen als reine Empfindung, diesen als Vorstellung oder Wahrnehmung bezeichnete. Da ich mir aber unter einer Farbe, die keinerlei räumliche Eigenschaften und also auch keinerlei Ausdehnung hätte, nichts Brauchbares zu denken vermag, so weiß ich auch mit den »reinen« Gesichtsempfindungen, wenn sie ganz unräumliche sein sollen, nichts anzufangen.

§ 4. Die Gedächtnisfarben. Das, was wir in einem gegebenen Augenblicke sehen, ist keineswegs nur bedingt durch die Art und Stärke der ins Auge fallenden Strahlungen und den jeweiligen Zustand des gesamten Netzhautapparates, vielmehr sind diese nur die sozusagen primären Entstehungsfaktoren der durch die Strahlungen veranlassten Farben. Zu ihnen gesellen sich die durch allerlei Nebenumstände geweckten Reproduktionen des früher Erfahrenen, welche als sekundäre und gleichsam accidentelle Faktoren das jeweilige Sehen mit bestimmen.

Denn wie der Klang, welchen das Anschlagen einer Klaviersaite erzeugt, nicht bloß von der Art des Anschlags und von der Stimmung der Saite, sondern auch von der elektiven Resonanz der übrigen Saiten und überhaupt aller in der Nähe befindlichen resonierenden Teile abhängt, so sind auch die Regungen, welche durch eine ins Auge fallende Strahlung in der nervösen Substanz herbeigeführt werden, nicht bloß durch die Art und Stärke der Strahlung, die angeborene Beschaffenheit und den jeweiligen Zustand der zunächst betroffenen Teile bedingt, sondern auch durch die angeborene oder erworbene Beschaffenheit aller mit den primär erregten in funktioneller Verbindung stehenden Teile des inneren Auges (3, S. 565—69).

Der Laie ist, wie schon gesagt, überzeugt, dass die Außendinge bestimmte Farben besitzen, dass der Schnee weiß, der Ruß schwarz, das

Gold gelb sei. Er schreibt diesen Farben ein vom Auge unabhängiges Bestehen zu, bezeichnet sie als die wirklichen Farben der bezüglichen Dinge und unterscheidet sie von den zufälligen Farben, welche dieselben Dinge unter ungewöhnlichen Umständen, z. B. bei unzureichender oder von der gewöhnlichen Tagesbeleuchtung stark abweichender Beleuchtung zeigen können. Das Rot der Berggipfel beim Alpenglühen, die Leichenblässe eines von Natriumlicht beleuchteten Gesichts, die bunten Flecke des Fußbodens, auf welche das durch bunte Fensterscheiben gehende Sonnenlicht fällt, sind solche zufällige Farben, die wir auf die jeweilige Art der Beleuchtung beziehen und nicht für Eigenschaften der betroffenen Dinge nehmen. Wer jedoch gelernt hat, dass der Schnee seine weiße, das Gold seine gelbe Farbe den von ihnen zurückgeworfenen Strahlen des Tageslichtes zu danken hat, kommt wohl gar zu der Ansicht, die wirkliche Farbe der Außendinge sei eigentlich schwarz, weil ihm irrigerweise Schwarz nur soviel als ein vollständiges Fehlen der Lichtstrahlen bedeutet. So oft er aber z. B. an den Schnee denkt, stellt er sich denselben doch wieder weiß vor; und so ergeht es allen, mögen sie viel oder gar nicht über das Wesen der Farben nachgedacht haben. Auch der Mineralog, für welchen der Schnee aus einer Anhäufung kleiner farblos durchsichtiger Wasserkrystalle besteht, der Chemiker, für den diese Krystalle wieder aus zahllosen Molekeln und Atomen aufgebaut sind, ein Physiker, der keine Molekeln und Atome, sondern nur Energien gelten lässt: sie alle verbinden zwangsweise mit der Vorstellung des Schnees die weiße Farbe.

Denn die Farbe, in welcher wir ein Außending überwiegend oft gesehen haben, prägt sich unserem Gedächtnis unauslöschlich ein und wird zu einer festen Eigenschaft des Erinnerungsbildes. Was der Laie die wirkliche Farbe eines Dinges nennt, ist eine in seinem Gedächtnis gleichsam fest gewordene Farbe desselben; ich möchte sie die Gedächtnisfarbe des Dinges nennen. Damit scheint mir ausgedrückt, in welcher Weise diese sogenannte wirkliche Farbe entsteht, und wie sie notwendig von allerlei individuellen Zufälligkeiten des von uns Erlebten einerseits und von der Beschaffenheit unseres Sehorganes andererseits abhängt. Für den Farbenblinden z. B. muss die »wirkliche« Farbe eines Außendinges in vielen Fällen eine ganz andere sein als für den Menschen mit normalem Farbensinn. Auch wird die Gedächtnisfarbe eines Dinges nicht eine ganz bestimmte sein müssen, sondern sie wird ihrer Entstehung gemäß eine gewisse Schwankungsbreite haben können.

Wie die Gedächtnisfarbe eines Dinges immer mit aufwacht, wenn durch ein beliebiges anderes Merkmal desselben oder auch nur durch das Wort, mit welchem wir das Ding bezeichnen, ein Erinnerungsbild desselben geweckt wird, so wird sie ganz besonders wachgerufen, wenn wir das bezügliche Ding wieder sehen oder auch nur zu sehen meinen, und sie ist dann für

die Art unseres Sehens mit bestimmend. Alle Dinge, die uns bereits aus Erfahrung bekannt sind, oder die wir für etwas uns nach seiner Farbe schon Bekanntes halten, sehen wir durch die Brille der Gedächtnisfarben und deshalb vielfach anders, als wir sie ohne dieselbe sehen würden. Bei der gewöhnlichen Flüchtigkeit des Sehens kann sogar die Gedächtnisfarbe eines eben sichtbaren Dinges an die Stelle einer ganz anderen Farbe treten, welche wir gesehen hätten, wenn jeder Anlass zur Reproduktion einer Gedächtnisfarbe ausgeschlossen wäre, immer vorausgesetzt, dass wir der Farbe nicht besondere Aufmerksamkeit zuwenden. Große Fertigkeit besitzen wir, die sogenannte wirkliche Farbe eines Dinges von den zufälligen Farben desselben zu scheiden. So sondern sich für uns jene fein abgestuften Schatten auf der Oberfläche eines Körpers, welche uns die Wahrnehmung seiner Form, seines Reliefs, seiner Entfernung mit vermitteln helfen, als etwas Accidentelles von der Farbe der schattentragenden Fläche, und wir meinen außer dem Dunkel des Schattens und durch ihn hindurch die »wirkliche« Farbe der Fläche zu sehen. Die an glatten Flächen auftretenden Glanzfarben trennen sich in der Wahrnehmung gewissermaßen von den »wirklichen« Farben der Fläche. Eine beschattete Stelle eines ebenen weißen Blattes erscheint uns anders als ein grauer Fleck auf dem Papier, welcher genau dieselbe Strahlung aussendet, wie die schattige Stelle; ein heller Fleck auf unserem Rocke ganz anders als eine zufällig stärker beleuchtete Stelle desselben, und zwar auch dann, wenn die bezügliche Strahlung beidenfalls dieselbe ist. Dies alles lässt sich leicht sehen, aber schwer beschreiben (4, § 24).

Hänge ich z. B. an einen Coconfaden ein Papierschnitzel so auf, dass es mittels einer passend angebrachten kleinen Glühlampe einen schwachen Schatten auf mein Schreibpapier wirft, so sehe ich den Schatten als ein zufällig auf dem Weiß liegendes Dunkel. Ziehe ich aber um den Kernschatten einen breiten schwarzen Strich, der den Halbschatten vollkommen deckt, so sehe ich innerhalb des schwarzen Umrisses eine graue Stelle genau so, wie wenn hier das weiße Papier mit Tusche grau gefärbt oder ein Stück grauen Papiers mit schwarzem Rande auf das weiße Papier geklebt wäre. Durch die Verdeckung des Halbschattens hat die dunklere Stelle ein wesentliches Kennzeichen des Schattens verloren. Verschiebe ich nun entweder das schattenwerfende Schnitzel oder das Papier ein wenig, so verschiebt sich entsprechend der Schatten etwas gegen die schwarze Umrandung, und dieselbe Stelle, die mir eben noch als ein graufarbiger Fleck erschien, giebt mir sofort wieder den Eindruck eines beschatteten Weiß. Es handelt sich dabei um ein wesentlich verschiedenes Sehen und nicht etwa nur um unser Wissen von der Verschiedenheit der äußeren Umstände.

Durch ein Loch im Fensterladen eines durch andere Fenster beleuch-

teten Zimmers fällt das Sonnenlicht auf eine begrenzte Stelle meines schwarzen Rockes: ich sehe einen grauen Fleck auf demselben und will ihn abstauben. Sobald ich aber die Stelle etwas genauer betrachte, sehe ich keinen Staubfleck mehr, sondern nur ein dem Schwarz des Rockes aufliegendes Licht und bin selbst bei indirektem Sehen kaum im stande, mir den ersten Eindruck wieder herzustellen. Oder ich gehe unter einem dichten Laubdache einen Weg, auf dem an beschränkter Stelle durch eine Lücke des Blätterdaches direktes Sonnenlicht fällt: im ersten Augenblicke meine ich eine durch verschütteten Kalk weiß gefärbte Stelle zu sehen; sobald ich aber genauer aufmerke, sehe ich kein Weiß mehr, sondern nur ein auf dem graubraunen Boden liegendes Licht.

Man nehme am Fenster stehend in die eine Hand ein weißes, in die andere ein graues Papier und halte dieselben bei kleinem gegenseitigen Abstand zunächst horizontal nebeneinander. Beide Papiere sollen steif, ganz eben, matt und undurchsichtig sein. Neigt man nun das graue Papier dem Fenster zu, das weiße von demselben ab, so wird sehr bald das Netzhautbild des grauen lichtstärker sein als das des weißen, aber obgleich man die Helligkeitsänderungen bemerkt, sieht man doch das jetzt lichtstärkere »wirklich« graue Papier noch grau und das jetzt lichtschwächere »wirklich« weiße noch weiß. Betrachtet man jedoch die Papiere nur mit einem Auge durch eine irgendwie fixierte Röhre, so gelingt es leicht, ihre Farben in einer und derselben Ebene zu sehen, falls ihre beiden Bilder unmittelbar und ohne Beschattung des einen aneinander grenzen, und von jedem Papier nur noch ein Segment sichtbar ist. Jetzt sieht man das graue Papier heller und das weiße dunkler, wie es einer Verschiedenheit der beiden Lichtstärken entspricht. Die in beiden Fällen verschiedene Lokalisierungsweise der Farbenflächen wirkt hier also mitbestimmend auf die gesehene Farbe. Neigen wir ein graues oder weißes Papier abwechselnd dem Fenster zu oder von ihm ab, so nehmen wir den sichtbar eintretenden Zuwuchs an Weißlichkeit (Helligkeit) oder Schwärzlichkeit (Dunkelheit) der Fläche als ein bloßes Accidens zu ihrer »wirklichen« Farbe; das weiße wie das graue Blatt behält für uns die Farbe »die es wirklich hat«, wenn es auch zufällig heller oder dunkler aussieht. Wir sehen also hier nicht die »wirkliche« Farbe der Fläche sich ändern, wie dies der Fall ist, wenn auf der Fläche aus irgendwelchem Grunde ein »Fleck« entsteht, sondern die der Fläche zugehörige Farbe scheint uns fort zu bestehen, obwohl wir ihre Änderung thatsächlich bemerken. In vielen Fällen wird sogar ein zufälliger Weißlichkeits- oder Schwärzlichkeits-Zuwuchs einer Fläche als etwas von ihrer »wirklichen« Farbe völlig Gesondertes gesehen: so z. B. wenn ein Schatten über eine Fläche läuft oder ein bewegter spiegelnder Körper einen sich bewegenden Lichtfleck auf der Fläche erzeugt.

So sehen wir auch einen schlecht beleuchteten Winkel eines im übrigen

gut beleuchteten Zimmers bedeckt oder erfüllt von einem Schwärzlichen, hinter welchem wir das im Winkel Befindliche in seiner wirklichen Farbe zu sehen meinen. Analoges gilt von allem, was sich im Hintergrunde eines nur einseitig durch Fenster beleuchteten Zimmers befindet. Wenn es vollends im Zimmer zu dämmern beginnt, legt sich ein zunehmendes Halbdunkel zwischen uns und die entfernteren Dinge, durch welches hindurch wir dieselben wie durch einen grauen Nebel sehen.

Das im Hintergrunde eines Zimmers Befindliche ist schlechter beleuchtet als das in der Nähe des Fensters Liegende; dementsprechend müsste für uns, wie man meinen könnte, die Farbe eines Dinges um so schwärzlicher sein, je weiter es vom Fenster abliegt. Dies ist auch in deutlichster Weise der Fall, wenn wir z. B. zwei ganz gleiche weiße Blätter in zureichend verschiedener Entfernung vom Fenster hintereinander und parallel zu dessen Fläche so aufstellen, dass wir durch eine dicht an ein Auge gehaltene Röhre von beiden Papieren nur je ein halbkreisförmiges Stück und zwar beide in derselben Ebene sehen; das eine erscheint dann weiß, das andere grau. Betrachten wir aber die Papiere aus ganz demselben Standpunkte binokular ohne Röhre, so sehen wir beide weiß.

Besonders belehrend ist folgender Versuch: Stelle ich mich mit dem Rücken an ein Fenster, halte vor mich ein Stück matten dunkelgrauen Papieres in vertikaler Lage und betrachte mit beiden Augen abwechselnd dieses Papier und die dahinter liegende weißgetünchte Zimmerwand, so erscheint mir letztere weiß, ersteres dunkelgrau, obwohl es wegen seiner günstigeren Beleuchtung viel lichtstärker ist, als die Wand. Nun fixiere ich, ohne die Lage des Papieres oder meines Kopfes irgendwie geändert zu haben, mit nur einem Auge den oberen Rand des grauen Papieres und bemühe mich die Farben des Papieres und der Wand in einer Ebene zu sehen: jetzt erscheint mir allerdings die Wand dunkler als das Papier. Sobald ich aber wieder nur die Wand betrachte, ohne gleichzeitig das Papier besonders zu beachten oder umgekehrt, sehe ich wieder die Wand weiß, das Papier dunkelgrau. Es lässt sich so einrichten, dass das graue Papier bei einer bestimmten Lage genau dieselbe Lichtstärke hat, wie die von ihm teilweise verdeckte Wand, was in der eben beschriebenen Weise mit Hilfe einer Röhre leicht festgestellt werden kann. Trotzdem sehe ich ohne Röhre bei abwechselnder binokularer Betrachtung der Wand und des Papieres beide ganz verschieden, das näher erscheinende Papier grau, die ferner erscheinende Wand weiß. Wenn ich aber den Rand des Papieres mit nur einem Auge fest fixiere, und es mir gelingt, die Farbe der Wand in derselben Ebene zu sehen wie die des Papieres, werden beide Farben ganz gleich.

Mit der verschiedenen Lokalisierung geht also auch hier trotz ganz gleicher Lichtstärke der beiden Flächen und unveränderter Stimmung des

Auges ein verschiedenes Farbensehen einher. Bei alldem handelt es sich nicht etwa um irgendwelche Erwägung der Beleuchtungsbedingungen, unter welchen die gesehenen Dinge sich eben befinden, sondern darum, dass der nervöse Apparat des Sehorganes im einen Falle anders auf genau dieselbe Strahlung reagiert, als im anderen, weil durch Nebenumstände, und zwar meist ebenfalls optische, beidenfalls verschiedene Reproduktionen geweckt werden.

Dementsprechend werden die tonfreien Sehqualitäten auch verschieden bezeichnet, je nachdem sie als Eigenschaften der Außendinge und als deren »wirkliche« Farbe genommen werden, oder aber als etwas unabhängig von der letzteren Bestehendes und für sie nur Accidentelles. Ersterenfalls nennt man sie gewöhnlich weiß, grau, schwarz, letzterenfalls hell oder dunkel, Licht oder Schatten bezw. Finsternis. Im allgemeinen giebt sich der Mensch gar keine besondere Rechenschaft von der Farbe die er eben sieht, er macht die Farben gar nicht zum Gegenstand besonderer Beachtung, sondern er benutzt sie nur als Zeichen, an denen er die Dinge wieder erkennt, und hierbei stellt sich ihm sofort auch die Gedächtnisfarbe der wiedererkannten Dinge ein. Es giebt Kleiderstoffe, die im Tageslicht blau, im Gas- oder elektrischen Glühlicht aber blaugrün aussehen, und es kommt vor, dass der Träger eines derartigen Stoffes es sonderbar findet, wenn man denselben bei künstlichem Lichte blaugrün nennt, da er selbst dies noch gar nicht bemerkt hat; ja manche sehen ihn auch dann noch blau, wenn man ihnen bereits gesagt hat, dass er blaugrün aussieht, obwohl sie durchaus farbentüchtige Augen haben. Hierher gehört auch die Thatsache, dass, wenn man jemand nach der Farbe fragt, die er nachts bei geschlossenen oder geöffneten Augen sieht, man fast ausnahmslos die Antwort bekommt, dass ihm da alles schwarz erscheine. Dabei handelt es sich nicht um eine Gedächtnisfarbe, sondern darum, dass der Gefragte sich überhaupt noch nie davon Rechenschaft gegeben hat, was er unter den erwähnten Umständen sieht, vielmehr von vornherein überzeugt ist, dass, wo keinerlei Licht ist, nur Schwarz gesehen werden könne.

Die Mannigfaltigkeit der Thatsachen, an welchen sich der Einfluss der Erfahrung und der Gedächtnisfarben insbesondere, sowie der jeweiligen Art der Lokalisierung auf das Farbensehen darlegen ließe, ist außerordentlich groß und harrt noch einer umfassenden Darstellung. Dies gilt besonders von dem Einflusse der Art des räumlichen Sehens der Farben auf die letzteren. Denn ebenso wie die Farben mitbestimmend werden können für die Lokalisierung nach der Dimension der Tiefe (Abschattung und Luftperspektive), ebenso kann umgekehrt die Art der Lokalisierung mitbestimmend werden für die Farben selbst. Hierbei kommt mit in Betracht, daß die Farben, wie schon angedeutet wurde, nicht nur flächenhaft, sondern auch raumhaft, d. h. als einen Raum nach allen drei Dimensionen erfüllend gesehen werden können. Schlagende Beispiele liefert hierfür ein durchsichtiger farbiger Glaswürfel, ein mit durchsichtiger farbiger Flüssig-

keit gefülltes Glas oder ein Strahlkegel, welchen man mit Hilfe einer Sammellinse in ein trübes oder ein klares, aber fluoreszierendes Medium wirft.

Einige in die Reihe der oben besprochenen gehörige Erscheinungen sind irrtümlich als Erscheinungen des Simultankontrastes aufgefasst worden, mit denen sie nichts zu thun haben, worauf später zurückzukommen sein wird. Hier galt es nur, an einigen Beispielen zu zeigen, wie notwendig es ist, bei der Untersuchung des Lichtsinnes alles, was die Farben unbeabsichtigter Weise zu beeinflussen und insbesondere die Sicherheit der Vergleichung zweier Farben zu stören vermag, überall wo es erforderlich scheint, soweit als möglich auszuschließen.

§ 5. Herstellung brauchbarer Farbenfelder. Eine ganz sichere Vergleichung zweier Farben ist nur möglich, falls die Nebenumstände, welche außer der Art und Stärke der beiden Strahlungen und der jeweiligen Empfindlichkeit der bezüglichen Teile des Sehorganes auf die Sehweise von Einfluss sein können, wenn auch nicht ausgeschlossen, so doch für beide Farben ganz gleichwertige sind. Beide Farben sollen also, abgesehen von ihrem Nebeneinander, in ganz analoger Weise lokalisiert erscheinen, und jede der beiden Farben soll so völlig homogen sein, dass sie an sich selbst keinerlei Verschiedenheiten zeigt und gar nicht als einem bestimmten Außendinge angehörig, sondern nur als ein unabhängig von einem bestimmten Träger für sich bestehendes ebenes oder raumfüllendes Quale gesehen wird. So lässt sich z. B. jede Hälfte des Gesichtsfeldes eines Fernrohres in so gleichmäßiger Weise mit je einer tonfrei oder bunt wirkenden Strahlung erleuchten, dass die beiden zu vergleichenden Farben allen soeben gestellten Anforderungen entsprechen.

Benutzt man zur Herstellung eines Farbenfeldes Papier, so soll dasselbe ganz eben sein, keinen Glanz haben und kein sogenanntes Korn zeigen. Man macht das Papier dadurch eben, dass man es nach vorausgegangener Befeuchtung über eine passend zugeschnittene Glasplatte spannt. Zeigt es dann bei der gewünschten Sehweite noch ein Korn, so bringt man es in größere Entfernung und stellt vor ihm in der gewünschten Sehweite einen ebenen Papierschirm mit passend geformter Öffnung auf, für welche man, eventuell mit Hilfe einer passenden Glaslinse, das Auge akkommodiert: dann wird bei passender Entfernung des durch die Öffnung hindurch sichtbaren Papiers das Korn desselben untermerklich, und man sieht bei zweckmäßiger Beleuchtung eine Farbenfläche von idealer Gleichartigkeit in der Ebene des gelochten Schirmes.

Dasselbe Ziel erreicht man mit Hilfe des Farbenkreisels (vgl. § 16). Infolge der raschen Rotation des Papiers verschwinden für das Auge alle Unebenheiten und sonstige kleine Unregelmäßigkeiten, und nichts erinnert mehr daran, dass wir ein bestimmtes Papier vor uns haben; der Unterschied zwischen der rotierenden und der unbewegten Papierscheibe ist oft

höchst überraschend. Alle zu solchen Versuchen benutzten Papiere sollen so matt als möglich sein; glänzende Papiere sind nur unter ganz besonderen Umständen brauchbar.

Schöne Farbenfelder erhält man ferner durch bunte Gläser und Gelatineplatten oder mit farbiger Flüssigkeit gefüllte Glasgefäße, welche aus Spiegelglasplatten zusammengesetzt sind. Dieselben werden hinter einem Schirm mit rundem oder quadratischem Ausschnitt angebracht, und man blickt durch letzteren auf einen hinter den farbigen Medien befindlichen gut beleuchteten, ganz ebenen weißen Schirm oder einen Spiegel, welcher einen größeren Teil der klaren oder ganz gleichmäßig bewölkten Himmelsfläche spiegelt. Bei sorgsamer Ausführung erhält man ein durchaus gleichartiges Farbenfeld.

Endlich lassen sich, insoweit es sich um bunte Farben handelt, die einzelnen Strahlungen des Spektrums zur Herstellung in sich ganz gleichartiger Farbenfelder verwenden. Entfernt man das Okular aus dem Fernrohr eines gewöhnlichen Spektralapparates, setzt in die Gegend des Spektrums eine Metallplatte mit einem feinen Spalte, dessen Schneiden in die Ebene des Spektrums zu liegen kommen, und bringt das Auge dem Spalte möglichst nahe, so sieht man die Fläche des Prismas in derjenigen Farbe leuchten, welche dem in den Spalt fallenden Streifen des Spektrums eben entspricht. Durch Drehung des Collimators oder auch durch seitliche Verschiebung des erwähnten Okularspaltes kann man sich alle einzelnen Farben des Spektrums nacheinander in den feinsten Abstufungen zur Anschauung bringen. Dem Farbenfelde giebt man eine kreisrunde Form dadurch, dass man ein Diaphragma mit passender Öffnung nahe der Vorderfläche des Prismas anbringt. Man erhält jedoch auf diese Weise nur ein kleines Farbenfeld, kann dasselbe aber, wenn nötig, mit Hilfe eines entsprechenden Linsensystems vergrößern.

Der von mir benutzte Apparat gestattet die Herstellung eines Farbenfeldes, welches auf eine Sehweite von 30 cm bezogen einen Durchmesser von 10 cm hat, was einem Gesichtswinkel von etwa 19° entspricht.

§ 6. Die angenäherte Farbenbeständigkeit der Sehdinge. Nicht um ein Schauen der Strahlungen als solcher handelt es sich beim Sehen, sondern um das durch diese Strahlungen vermittelte Schauen der Außendinge; das Auge hat uns nicht über die jeweilige Intensität oder Qualität des von den Außendingen kommenden Lichtes, sondern über diese Dinge selbst zu unterrichten. Dies vermag es freilich nur bei einer zureichenden Beleuchtung derselben; die fortwährende Änderung dieser Beleuchtung aber ist dazu nicht nur nicht erforderlich, sondern dieselbe würde vielmehr dem Auge die Erfüllung seiner wesentlichen Aufgabe in hohem Grade erschweren oder ganz unmöglich machen, wenn sie nicht

durch ausgleichende Einrichtungen bis zu einem gewissen Grade unschädlich gemacht würde. Diese ermöglichen es, dass wenigstens innerhalb gewisser Grenzen der Beleuchtungsänderung die Außendinge ein ziemlich unverändertes Aussehen bewahren, die weißen weiß, die grauen grau, die schwarzen schwarz bleiben, so dass wir sie auch an der Farbe, die sie uns hervorrufen, wiederzuerkennen vermögen (5, S. 335—38).

Wir schreiben, wie schon erörtert wurde, den Außendingen ganz bestimmte Farben zu, der Kreide die weiße, dem Schwefel die gelbe, der Kohle die schwarze Farbe; wir sprechen von weißem Papier und von den schwarzen Buchstaben einer Schrift. Die Farbe ist uns ein wesentliches Attribut, eine ständige Eigenschaft dieser Dinge.

Bedenken wir dem gegenüber die großen alltäglich wiederkehrenden quantitativen und qualitativen Verschiedenheiten der natürlichen oder künstlichen Beleuchtungen, bei denen ein deutliches Sehen möglich ist, so muss es eigentlich überraschen, dass wir überhaupt die Farben als den Dingen adhärierende und nicht als bloß accidentelle und daher einem fortwährenden Wechsel unterworfene Eigenschaften nehmen, wie z. B. ihre Kälte, Kühle, Wärme oder Hitze.

Das Papier eines Buches sehen wir bei jeder zum Lesen bequemen Beleuchtung weiß und die Buchstaben schwarz, ebenso morgens, wie mittags oder abends, und gleichviel ob wir bei blauem oder grauem Himmel oder unter dem grünen Laubdache eines Waldes, ob wir bei Tageslicht, Gaslicht, elektrischem Bogen- oder Glühlicht lesen. Die meisten bemerken selbst große Verschiedenheiten zweier Beleuchtungen erst dann, wenn dieselben nebeneinander oder rasch nacheinander zur Wirkung kommen.

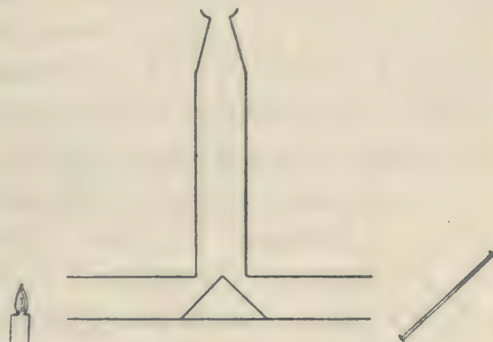
Ich habe das Intensitätsverhältnis festgestellt, welches bei Tagesbeleuchtung zwischen dem vom »weißen« Papier und dem von den »schwarzen« Buchstaben einer guten Druckschrift zurückgeworfenen Lichte besteht, und dasselbe günstigen Falles beiläufig gleich 15 : 1 gefunden. Dies bedeutet also, dass von der Flächeneinheit des unbedruckten Grundes nur 15 mal soviel Licht zurückgeworfen wurde, als von der Flächeneinheit der Buchstaben. Andererseits verglich ich einige Male die Intensität der Beleuchtung meines Arbeitstisches am frühen Morgen, wenn dieselbe zum ganz bequemen Lesen eben zureichend war, mit der Beleuchtung desselben Tisches am Mittag eines hellen Tages bei weißwolkigem Himmel und fand das Verhältnis beiläufig gleich 1 : 50. Somit waren bei der Mittagsbeleuchtung die schwarzen Buchstaben etwa dreimal lichtstärker als bei der Morgenbeleuchtung das weiße Papier, und die Lichtstärke des letzteren betrug des Morgens nur etwa $^1/_3$ der Lichtstärke, welche die Buchstaben des Mittags hatten. Trotz alledem aber erschienen bei der einen und bei der anderen Beleuchtung die Buchstaben schwarz und das Papier weiß. Wäre die Farbe oder, wie man hier auch sagen kann, die Helligkeit des Papiers und

die Dunkelheit der Buchstaben nicht innerhalb weiter Grenzen unabhängig von der Stärke der Beleuchtung, so hätten mir dieselben Buchstaben, welche ich des Morgens schwarz sah, des Mittags weiß und sogar noch viel heller erscheinen müssen als des Morgens das weiße Papier, oder es hätte mir umgekehrt das »weiße« Papier des Morgens tiefer schwarz erscheinen müssen, als des Mittags die Buchstaben.

Derartige Thatsachen kommen im Laufe eines jeden Tages zahllos zur Beobachtung, aber eben weil sie alltäglich sind, werden sie als selbstverständlich hingenommen. Es sei deshalb noch folgendes Beispiel für die weitgehende Unabhängigkeit der Farbe von der allgemeinen Beleuchtung angeführt, welches alle, denen ich es vorgeführt habe, in hohem Grade überrascht hat, obwohl es um nichts merkwürdiger ist, als das soeben besprochene Beispiel des weißen Papiers und der schwarzen Buchstaben.

Die eine Kathetenfläche des rechtwinkligen Holzprismas in einem Bouguer'schen Photometer (Fig. 1) bedecke ich mit einem ganz ebenen, nicht glänzenden braunen, die andere mit einem ebensolchen ultramarinblauen Papier, welche beide sorgfältig für den Versuch ausgewählt worden sind. Das braune Papier beleuchte ich mittels eines Spiegels durch das Licht der weißen Himmelsfläche, das andere durch eine gewöhnliche Gasflamme oder eine Edisonlampe, wie dies die Figur veranschaulicht. Durch das vertikale Rohr des Photometers betrachtet, erscheint bei passend gewählter Intensität des künstlichen Lichtes das »blaue« Papier genau ebenso wie das »braune«, d. h. ebenfalls braun, weil in solchem Lichte die blauwirkenden Strahlen von den gelbwirkenden völlig übertönt werden. Schließe ich aber die Fensterladen, beleuchte das ganze Zimmer mit Gas- oder Edisonlampen und nehme beide Papiere aus dem Apparat, so erscheint mir sofort das »blaue« Papier, obwohl es nach wie vor von demselben künstlichen Lichte beleuchtet ist und noch immer dasselbe Strahlgemisch in mein Auge schickt, nicht mehr braun, sondern wieder blau, wie bei Tagesbeleuchtung, wenngleich dunkler, während das »braune« Papier nach wie vor braun aussieht. Hierbei ist ganz gleichgültig, ob der Beobachter die »wirkliche« Farbe der Papiere kennt oder nicht.

Fig. 1.



Der Versuch zeigt, dass für unser Auge ein bei Tagesbeleuchtung blau erscheinendes Papier auch bei der ganz andersartigen künstlichen Beleuchtung blau bleiben kann, obwohl es jetzt ein Strahlgemisch zurückwirft, welches wir bei Tage auch nicht entfernt blau, sondern vielmehr braun sehen. Hatten wir an dem mit schwarzen Buchstaben bedruckten weißen

Papier ein Beispiel für die weitgehende Unabhängigkeit der tonfreien Farben der Sehdinge von der Intensität der allgemeinen Beleuchtung, so haben wir hier ein Beispiel für die weitgehende Unabhängigkeit einer bunten Farbe eines Sehdinges von der Qualität der allgemeinen Beleuchtung.

Wenn wir im erwähnten Photometer die eine Hälfte eines bedruckten Papiers mit 50mal stärkerem Tageslichte beleuchten, als die andere, so sehen wir die erstere weiß mit schwarzen Buchstaben, die letztere schwarz und ohne oder mit kaum erkennbaren Buchstaben; sobald aber das ganze Gesichtsfeld entweder mit dem starken oder mit dem schwachen Lichte beleuchtet ist, erscheint beiderseits das Papier weiß, die Schrift schwarz.

Die angenäherte Konstanz der Farben der Sehdinge trotz großen quantitativen oder qualitativen Änderungen der allgemeinen Beleuchtung des Gesichtsfeldes ist eine der merkwürdigsten und wichtigsten Thatsachen im Gebiete der physiologischen Optik. Ohne diese angenäherte Konstanz würde uns ein Stück Kreide an einem trüben Tage dieselbe Farbe zeigen, wie ein Stück Kohle an einem sonnigen Tage, und im Laufe eines Tages würde es alle möglichen zwischen schwarz und weiß liegenden Farben annehmen müssen. Ebenso würde eine unter grünem Laubdache gesehene weiße Blume dieselbe Farbe zeigen, wie ein grünes Baumblatt unter freiem Himmel, und ein bei Tageslicht weißer Zwirnknäuel müsste bei Gaslicht die Farbe einer Orange zeigen. Wenn sich in dieser Weise die Farben der Außendinge den Änderungen der Beleuchtung entsprechend fortwährend ändern würden, so würde es gar nicht dazu kommen, dass die einzelnen Dinge bestimmte Farben für uns haben, welche wir als wesentliche Eigenschaften derselben auffassen und als ihre wirklichen Farben bezeichnen, vielmehr würden wir der Kreide oder der Kohle das Weiß bezw. Schwarz ebensowenig als ein ständiges Attribut beilegen, wie dem Eisen das Kalt oder Warm, welches uns von demselben je nach seiner wechselnden Temperatur erzeugt und von uns als eine nur zufällige Eigenschaft desselben genommen wird. Die Gedächtnisfarben würden also gar nicht entstehen können (5, S. 338).

Dann könnte uns zwar die jeweilige Farbe, in der uns ein bestimmtes Ding erscheint, zu einem Merkmal für die Intensität oder Qualität seiner Beleuchtung werden, nicht aber zu einem Merkmal des Dinges selbst. Nur weil innerhalb der zu einem bequemen Sehen brauchbaren Beleuchtungen der Ruß stets schwarz, das Mehl stets weiß aussieht, werden diese Farben für uns zu einem ständigen Merkmal jener Dinge. Auf die Beleuchtung selbst aber pflegen wir gar nicht zu achten, so lange dieselbe ein deutliches Sehen gestattet und nicht zu schwach oder aber blendend ist.

Indem wir vorerst von den qualitativen Anderungen der allgemeinen Beleuchtung und den bunten Farben ganz absehen, wollen wir uns nun

fragen, wie die angenäherte Konstanz der tonfreien Farben der Sehdinge trotz der fortwährend sich ändernden Stärke der Beleuchtung ermöglicht wird.

Schon das äußere Auge besitzt in der Iris eine Anpassungsvorrichtung. Jede Verkleinerung oder Vergrößerung der Pupillenfläche bedingt eine direkt proportionale Verminderung oder Vermehrung des zur Netzhaut gelangenden Lichtes, bedeutet also für das innere Auge dasselbe, wie eine gleichgroße Abnahme oder Zunahme der Beleuchtungsstärke der Außendinge. Da nun die Pupille sich verkleinert, wenn die Stärke der Beleuchtung wächst, und sich vergrößert, wenn letztere abnimmt, so folgt, dass die bleibende Änderung der Lichtstärke des Netzhautbildes kleiner sein wird, als die vorhergegangene Änderung der Beleuchtung des Gesichtsfeldes. Indessen findet ein derartiger teilweiser Ausgleich der Beleuchtungsänderungen durch die Pupille nicht entfernt so ausgiebig statt, dass sich schon hieraus das angenäherte Gleichbleiben der tonfreien Farben innerhalb der Grenzen der zum deutlichen Sehen brauchbaren Beleuchtungsstärken ableiten ließe.

Vielmehr ist das wesentliche Mittel, die Farben der Sehdinge trotz dem Wechsel der Beleuchtung des Gesichtsfeldes angenähert konstant zu erhalten, in den Änderungen der Empfindlichkeit des Auges gegenüber dem Lichte gegeben, wodurch sich das Sehorgan jeder innerhalb gewisser Grenzen bleibenden Stärke der Gesamtbeleuchtung seiner Netzhaut derart anzupassen vermag, dass selbst große Änderungen der Beleuchtung, wenn sie nicht allzuschnell erfolgen, nur verhältnismäßig geringe Änderungen der Farben der Dinge herbeiführen.

Diese Selbststeuerung der Lichtempfindlichkeit wird durch zwei verschiedene Einrichtungen vermittelt, einerseits durch die Wechselwirkung der somatischen Sehfeldstellen (vgl. § 7 u. 21), andererseits dadurch, dass das innere Auge sich durch eine allmähliche Änderung seines Zustandes mit jeder andauernden Gesamtbeleuchtung, sei dieselbe schwach oder stark, in eine Art Gleichgewicht zu bringen vermag, vermöge dessen die Durchschnittshelligkeit im Sehfelde immer wieder ungefähr dieselbe wird. Inwieweit dies durch Änderungen der Aufnahmsfähigkeit des Empfangsorganes und inwieweit es durch eine anhaltende Zustandsänderung der Sehsubstanz (vgl. § 7) selbst ermöglicht werden kann, wird später zu erörtern sein.

Aubert (6) hat zuerst die allmähliche Anpassung der Lichtempfindlichkeit an die Beleuchtungsstärke eingehender untersucht und A d a p t a t i o n benannt. Ich habe dieselbe als s u c c e s s i v e oder Dauer-Anpassung bezeichnet zum Unterschiede von der durch die Wechselwirkung der Sehfeldstellen vermittelten Anpassung.

Diese Wechselwirkung besteht darin, dass die jeweilige Regung jedes einzelnen somatischen Sehfeldelementes (vgl. § 7) mitbestimmend ist für die Lichtempfindlichkeit der übrigen, und dass umgekehrt auch seine eigene

Lichtempfindlichkeit von den gleichzeitigen Regungen der übrigen Elemente mit abhängt. So kommt es, dass die durch das Licht in einem Sehfeldelemente hervorgerufene Änderung schon während ihrer Entstehung und in dem Maße, als sie unter dem Einflusse des Reizes sich entwickelt, umstimmend auf das übrige somatische Sehfeld wirkt und dessen Lichtempfindlichkeit mindert. Auf diese Weise wird die Lichtempfindlichkeit einer Sehfeldstelle zu einer Funktion der Gesamtbeleuchtung der Netzhaut und insbesondere um so kleiner, je stärker diese Beleuchtung ist.

Die durch diese Wechselwirkung bedingte Anpassung der Lichtempfindlichkeit vollzieht sich also nahezu gleichzeitig mit der Änderung der Beleuchtung, weshalb ich sie als simultane oder Moment-Anpassung benannt habe, während die successive Anpassung das Fortbestehen einer stärkeren bezw. schwächeren Beleuchtung zur Voraussetzung hat, daher man diese Art der Anpassung auch als Ermüdung bezw. Erholung bezeichnet hat.

Wir können somit sagen, dass das Sehorgan sich der verschiedenen Stärke der im Außenraume herrschenden Beleuchtung in dreifacher Weise anzupassen vermag, und können eine Anpassung des äußeren Auges mittels der Änderungen der Pupillenweite und eine Anpassung des inneren Auges unterscheiden. Die letztere aber erfolgt in doppelter Weise, erstens durch die Wechselwirkung der somatischen Sehfeldstellen aufeinander und zweitens durch die Zustandsänderungen, welche das innere Auge infolge andauernd stärker oder schwächer gewordener Gesamtbelichtung der Netzhaut erfährt (Adaptation nach Aubert).

Da Aubert's bezügliche Untersuchungen sich darauf beschränkten, die allmähliche Steigerung der Lichtempfindlichkeit nach dem Übertritt aus einem beleuchteten in ein gänzlich lichtloses Dunkel-Zimmer festzustellen, so gewöhnte man sich, unter Adaptation nur die Zunahme der Lichtempfindlichkeit im Finstern zu verstehen, obwohl sicher schon Aubert den Begriff der Adaptation weitergefasst wissen wollte. Ich habe deshalb seinerzeit der Dunkeladaptation die Helladaptation gegenübergestellt. Ausgehend von der maximalen Lichtempfindlichkeit, welche das Auge während einer finsteren Nacht annimmt, kann man von einer bis zu Mittag wachsenden Helladaptation, und ausgehend von der kleinen Lichtempfindlichkeit, welche sich bei maximaler Tagesbeleuchtung eingestellt hat, von einer bis in die Nacht hinein zunehmenden Dunkeladaptation sprechen.

Handelt es sich nicht um den Vorgang der Anpassung, sondern um den Zustand, in welchem sich das Auge infolge einer successiven Anpassung eben befindet, so verstehe ich unter einem helladaptierten Auge ein solches, welches für irgendeine zum deutlichen Sehen der Außendinge brauchbare Beleuchtungsstärke angepasst ist, gleichviel wie stark oder schwach die letztere im übrigen ist; unter einem dunkeladaptierten Auge aber eines, das für eine zum deutlichen Sehen, wie z. B. zum bequemen

Lesen, unzureichende Beleuchtung angepasst ist, wobei es zwar noch Außendinge zu unterscheiden, aber nicht mit der Deutlichkeit zu sehen vermag, wie ein für eine brauchbare, stärkere Beleuchtung angepasstes.

In der letzten Zeit ist das Wort Adaptation vielfach in einem so engen Sinne gebraucht worden, dass es sich zur Bezeichnung dessen, was ich hier als Anpassung des Auges für die jeweilige Beleuchtung benannt habe, gar nicht mehr eignen würde. Man hat gesagt, der dem stäbchenlosen centralen Netzhautgebiete entsprechende Teil des somatischen Sehfeldes besitze überhaupt kein Adaptationsvermögen. Indem man auf diese Weise den für das Sehen wichtigsten Teil des Sehfeldes ausschloss, ließ man die Adaptation nur noch für das indirekte Sehen gelten, und schließlich bedeuteten für einzelne Autoren die verschiedenen Adaptationszustände nur noch einen verschiedenen Gehalt der Stäbchen an Sehpurpur, d. h. man glaubte, abgesehen von der Pupille, aus den Änderungen des Purpurgehaltes der Stäbchen die ganze Anpassung des Auges an die Beleuchtungsstärke des Gesichtsfeldes erklären zu können.

Durch das Zusammenwirken der besprochenen Regulierungsvorrichtungen oder Selbststeuerungen werden die Farbenänderungen im Sehfelde in viel engeren Grenzen gehalten als wie solche den Intensitätsänderungen der Beleuchtung gezogen sind; die Farbe, in der uns ein Außending erscheint, bekommt abgesehen von den Grenzfällen eine gewisse Ständigkeit und wird in unserem Gedächtnis zu einem bleibenden, integrierenden Bestandteil des Dinges. Haben sich auf diese Weise die Gedächtnisfarben der Dinge gebildet, so werden sie weiterhin ihrerseits von Einfluss auf die Art unseres Sehens, und zu den soeben beschriebenen physiologischen Faktoren, welche neben den eben wirkenden Strahlungen die Farbe der Sehdinge bestimmen, gesellt sich also noch einer, den man nach der üblichen Terminologie als einen »psychologischen« insofern bezeichnen könnte, als er auf bereits gesammelten, in der nervösen Substanz fixierten individuellen Erfahrungen beruht, während die erwähnten physiologischen Regulierungsvorrichtungen schon beim Erwerb dieser Erfahrungen in Funktion sind und diese Erfahrungen erst mit ermöglichen.

Was ich in § 4 über den Einfluss der Gedächtnisfarben mitgeteilt habe, könnte zu der Ansicht verführen, dass die angenäherte Konstanz der Farben, die ich soeben auf physiologische Regulierungsvorrichtungen oder Anpassungen zurückgeführt habe, überhaupt nur das Ergebnis einer »psychologischen« Anpassung an die verschiedenen Beleuchtungen des Außenraumes sei. Wenn wir z. B. den unbedruckten Saum eines im Hintergrunde des Zimmers hängenden Kupferstiches nicht dunkelgrau sondern weiß sehen, obwohl seine Lichtstärke vielleicht kleiner ist als diejenige eines in der Nähe des Fensters befindlichen und uns dunkelgrau erscheinenden Papieres, und wenn wir also im stande sind, die mit der Entfernung vom Fenster zunehmende Schattigkeit oder Abnahme der Beleuchtungsstärke bei der Art unseres Sehens gleichsam mit einzurechnen, so könnte man meinen, dass

wir auch im stande seien, die im Laufe eines Tages eintretenden Zu- oder Abnahmen der Gesamtbeleuchtung mit einzurechnen und die »wirklichen« Farben der Dinge danach »abzuschätzen«.

Helmholtz war solcher Ansicht, und dieselbe ist in seiner Schule die herrschende. Je nach der Art und Stärke der wirklichen oder auch vermeintlichen allgemeinen Beleuchtung sollen wir einen verschiedenen Maßstab an unsere Lichtempfindungen legen und danach die Farben der Außendinge bemessen. Die Farbe, in welcher wir ein Ding sehen, soll also, gleichen »Ermüdungszustand« des Sehorganes vorausgesetzt, ein Ergebnis dieser Bemessung und deshalb bei gleicher »Intensität oder Qualität der Lichtempfindung« eine verschiedene, bei verschiedener »Empfindungs-Intensität oder Qualität« die gleiche sein können. Nicht die Art und das Ausmaß der physischen Regungen der Sehsubstanz des inneren Auges soll hier das Bestimmende für die im Sehfeld erscheinenden Farben sein, sondern ein unbewusster Schluss, welchen wir aus der Intensität der allgemeinen Beleuchtung auf die »Körperfarben« ziehen.

Da wir jedoch nur auf Grund der Farben, in welchen wir die Dinge sehen, zur Kenntnis der Beleuchtungsintensität als des angeblichen Maßstabes unserer Abschätzungen kommen könnten, andererseits aber eben diese Farben erst das Ergebnis dieser Abschätzungen sein sollen, so bewegt sich die soeben geschilderte Auffassung in einem unfruchtbaren Zirkel.

Dass die Art, in welcher wir die Außendinge sehen, in zuweilen überwältigender Weise durch unsere Erfahrung mitbestimmt wird, ist freilich richtig; aber man darf nicht diejenigen angeborenen Funktionen des Sehorganes, auf Grund deren diese Erfahrungen erst erworben worden sind, selbst wieder als ein Produkt der Erfahrung hinstellen. Dies thut man aber, wie noch weiter gezeigt werden wird, wenn man insbesondere die auf der Simultananpassung beruhenden Thatsachen aus einem erworbenen, auf unbewussten Schlüssen und Urteilen beruhenden »psychologischen« Anpassungsvermögen zu erklären versucht.

§ 7. Die Farben als psychische Korrelate der physischen Regungen der Sehsubstanz. In einem für Ärzte geschriebenen Werke braucht nicht weiter auseinandergesetzt zu werden, warum wir annehmen, dass das Sehen, als ein psychisches Geschehen, stets begleitet ist von einem physischen Geschehen in der nervösen Substanz des inneren Auges, und dass jeder Farbe eine bestimmte Regung des letzteren entspricht, welche wir als das somatische Korrelat der Farbe bezeichnen können. Alles Sehen ist also für den Physiologen gleichsam der psychische Ausdruck der Regungen in der Sehsubstanz des inneren Auges, wenn wir unter dieser, wie ich dies seinerzeit gethan, den physischen Träger derjenigen Vorgänge

verstehen, mit welchen die Farben als psychische Phänomene unmittelbar gegeben sind (4, § 25)[1]).

Den einzelnen Elementen des psychischen Sehfeldes als der Gesamtheit der jeweiligen aus den Farben bestehenden Sehdinge entsprechen die korrelativen nervösen Elemente des inneren Auges, welche wir in ihrer Gesamtheit als das somatische Sehfeld benennen können; den einzelnen Elementen dieses somatischen Sehfeldes entsprechen die zugeordneten Elemente der Stäbchen- und Zapfenschicht als der Trägerin des Netzhautbildes; den einzelnen Elementen des jeweiligen Netzhautbildes entsprechen die Einzelteile des Gesichtsfeldes oder Gesichtsraumes, wie ich den jeweiligen Komplex der sichtbaren wirklichen Dinge im Gegensatze zum psychischen Sehfeld oder Sehraum genannt habe. So ergiebt sich also eine Kette von Relationen, an deren einem Ende das Farbengebilde oder Sehding, am anderen das wirkliche Außending steht. Wir haben die Aufgabe, die Gesetze aller dieser Relationen oder funktionellen Zusammenhänge möglichst festzustellen; mit anderen Worten: wir haben für all die verschiedenen Sehqualitäten oder Farben die äußeren und inneren Bedingungen aufzusuchen, unter denen sie zur Erscheinung kommen.

Der Zusammenhang zwischen den Außendingen und ihrem Netzhautbilde ist uns Dank der hochentwickelten Dioptrik des Auges in allen Einzelheiten ziemlich genau bekannt. Über die Beziehungen zwischen dem Netzhautbilde als einem Komplexe räumlich verteilter Lichtenergien und den Vorgängen in der Stäbchen- und Zapfenschicht als dem Empfangsorgane oder Empfänger des inneren Auges haben uns die Entdeckungen des Sehpurpurs, der Netzhautströme und der morphologischen Änderungen in der Netzhaut durch Licht viel wichtiges gelehrt; doch über den Zusammenhang zwischen diesen Vorgängen und den Regungen der Sehsubstanz giebt es nur Vermutungen. Was endlich die Relationen zwischen diesen Regungen und den jeweiligen Farben des Sehfeldes betrifft, so sind sie, weil es sich hier nicht mehr um Beziehungen zwischen Physischem und Physischem, sondern zwischen Physischem und Psychischem handelt, ganz anderer Art und einer Feststellung um so schwerer zugänglich, als uns nur das eine Glied dieser Beziehung, nämlich die ins Bewusstsein getretene Farbe bekannt ist, während wir über das andere Glied, nämlich über die sogen. psychophysischen Vorgänge in der Sehsubstanz, mit denen die Erscheinung der Farbe unmittelbar verknüpft ist, nur Hypothesen machen können.

Ohne hier dem großen Rätsel des Zusammenhanges zwischen »Leib und Seele« näher treten zu wollen, darf ich doch daran erinnern, dass diese »psychophysischen« Prozesse nicht als das Endglied der nervösen Regungen anzusehen

---

1) Später hat W. Kühne den Sehpurpur und andere lichtempfindliche Stoffe des Sehepithels der Netzhaut als Sehstoffe bezeichnet, was dann zu einer Verwechslung dieser Stoffe mit der Sehsubstanz im oben definierten Sinne geführt hat.

sind, welche sich an die Reizung der Netzhaut anschließen. Man dürfte sich nicht vorstellen, dass mit ihnen das somatische Geschehen ein Ende finde, und dafür ein psychisches Geschehen beginne, welches dann seinerseits wieder somatische, z. B. motorische Vorgänge veranlassen könne. In die Kette »materieller« Hirnprozesse lässt sich, vom Standpunkte der Physiologie, nicht ein »immaterielles« Glied eingeschoben denken. Deshalb sollte man auch nicht jene psychophysischen Prozesse als die »terminalen« bezeichnen und sagen, dass sich dieselben »in Empfindungen umsetzen«. Denn ein physischer Prozess kann sich wohl in einen anderen physischen, nicht aber in einen psychischen umsetzen. Eine ununterbrochene Reihe somatischer Vorgänge verbindet z. B. die durch ein starkes Licht in der Netzhaut bewirkte Änderung mit den Muskelkontraktionen, durch welche die schützende Hand vor das geblendete Auge geführt wird; dass mit all dem ein psychisches Geschehen, ein Empfinden und Wollen einhergeht, darf den Physiologen in dieser Annahme nicht beirren.

An die vom Lichte in den peripheren Endgliedern des nervösen Netzhautapparates veranlassten Regungen knüpfen sich weiterhin unter Vermittelung des Sehnerven die Regungen des Gehirnes, und wie schon in dem verwickelten Nervensystem der Netzhaut »ein Schlag tausend Verbindungen schlägt«, so noch viel mehr im Gehirn. Wo aber schließlich in unserem Nervensystem diese somatischen Regungen als eigentlich terminale ausklingen, davon erfahren wir nur dann etwas, wenn der motorische oder sekretorische Apparat irgendwie und irgendwo davon in merkliche Mitleidenschaft versetzt wird.

Es sei hier ein Gleichnis gestattet. Von dem vor einem Spiegel befindlichen Dinge erstrecken sich keine wirklichen Strahlungen bis zu dem hinter dem Spiegel erscheinenden Bilde des Dinges, keine Kette physischer Vorgänge verbindet das Ding mit seinem Spiegelbilde und die »terminalen Prozesse«, in welchen die von dem Dinge ausgehende strahlende Energie als solche ihr Ende findet, liegen diesseits des Spiegels. Und wie sich diese Energie nicht hinter dem Spiegel in das dort erscheinende Bild umsetzt, ebensowenig setzt sich die somatische Regung unserer Sehsubstanz irgendwie um in psychische Regung. Solches anzunehmen scheint mir nicht besser, als die gespiegelten Dinge hinter dem Spiegel zu suchen.

Wohl dürfen wir ferner das Nervensystem insbesondere als den Träger der Vorgänge betrachten, welche wir uns als die somatischen Begleiter des psychischen Lebens denken, aber voreilig wäre es, nur die Hirnrinde als den Ort der »psychophysischen Prozesse« gelten zu lassen und alles übrige und hier insbesondere die Netzhaut auszuschließen. Denn dass Einer auch nach Verlust der Netzhäute noch optische Empfindungen haben kann, schließt nicht aus, dass unter normalen Umständen auch die Regungen der Netzhaut zum somatischen Korrelat der Gesichtsempfindungen gehören und also psychophysisch mitfungieren.

Aus dem oben Gesagten erklärt sich, dass man sich bisher bei der Untersuchung des Lichtsinnes im wesentlichen darauf beschränken musste, die Regeln festzustellen, nach welchen die jeweiligen Farben im Sehfelde abhängen von der Beschaffenheit sowie von der räumlichen und zeitlichen Verteilung der die Netzhaut treffenden Strahlungen, und aus diesen Regeln einige Wahrscheinlichkeitsschlüsse auf die Bedeutung der bisher bekannt gewordenen Änderungen zu machen, welche im Sehepithel durch das Licht herbeigeführt werden. Gegeben sind uns also bei der Aufsuchung jener

Regeln einerseits die Farben als Sehqualitäten im oben (§ 2) definierten Sinne, andererseits die von den Physikern angenommenen Ätherschwingungen oder Strahlungen, insoweit dieselben optisch wirksam sind. Wir haben es dabei, abgesehen von besonderen und fast ausschließlich künstlich herbeigeführten Fällen nicht mit einfachen (homogenen), sondern mit zusammengesetzten Strahlungen oder Strahlgemischen zu thun. Jedes solche Strahlgemisch lässt sich in gewissem Sinne als aus einer Anzahl einfacher, durch ihre Schwingungszahl bestimmter Strahlungen zusammengesetzt auffassen, deren Einzelenergien in bestimmtem Verhältnis zu einander stehen. Dieser Mannigfaltigkeit der Strahlgemische, in welcher die einfache oder homogene Strahlung als besonderer Fall erscheint, steht nun die Mannigfaltigkeit der Farben gegenüber, und es erwächst uns also zunächst die Aufgabe, welche die Physik betreffs der hier in Betracht kommenden optischen Strahlungen bereits erfüllt hat, auch für die Mannigfaltigkeit der Farben zu erfüllen und festzustellen, ob und welche Variablen sich in derselben feststellen lassen. Daher gilt es, die Farben oder Sehqualitäten auf alle ihre unterscheidbaren Eigenschaften genau zu untersuchen, um sie nach diesen ihren Merkmalen, ihren gegenseitigen Ähnlichkeiten und Verschiedenheiten ordnen zu können, wie der Physiker die verschiedenen Strahlungen längst nach ihren Variablen geordnet hat. Erst dann wird es möglich sein, die Regeln oder Gesetze festzustellen, nach welchen die einzelnen Variablen der Farben von den einzelnen Variablen der Strahlgemische abhängig sind. Wie sich für die Physik aus der vergleichenden Untersuchung der verschiedenen Strahlungen die Eigenschaften ergeben haben, bezüglich welcher sie untereinander vergleichbar und mit Hilfe deren die einzelnen Strahlungen eindeutig definierbar sind, so ergeben sich aus der vergleichenden Untersuchung der Farben die Merkmale, bezüglich deren eine Vergleichung bezw. Unterscheidung und eine Definition der einzelnen Farben möglich ist.

Seit ich vor mehr als 30 Jahren (4, § 38), insbesondere gegenüber der von Helmholtz gegebenen Darstellung, eine ohne Rücksicht auf die jeweiligen Entstehungsbedingungen der Farben durchzuführende, lediglich auf die Eigenschaften der Farben selbst gegründete Analyse und Ordnung derselben als eine unentbehrliche Grundlage der Lehre von den Gesichtsempfindungen hingestellt habe, hat diese Auffassung trotz anfänglichem Einspruch seitens verdienter Autoritäten ziemlich allgemeine Geltung gewonnen; aber ihre prinzipielle Anerkennung hat nicht verhüten können, dass sie bei der Erörterung der Einzelheiten immer wieder außer acht gelassen wird.

II. Abschnitt.

Das natürliche Farbensystem.

§ 8. Grundsätze für die Ordnung der Farben. Wenn es gilt, die große Mannigfaltigkeit der Farben zu ordnen, um eine systematische

Übersicht über dieselben und Bezeichnungen für sie derart zu gewinnen, dass für jede einzelne in möglichst bestimmter Weise ein dem Leser verständlicher Ausdruck gegeben wird, welcher ihm ermöglicht, sich eben diese Farbe mit einiger Genauigkeit innerlich zu reproduzieren, so ist erforderlich, dass wir zunächst ganz und gar von den Ursachen und Bedingungen ihrer Entstehung absehen. Nur die Farben selbst dürfen das für ihre systematische Gruppierung Maßgebende sein, nicht aber z. B. die physikalische Beschaffenheit der Strahlungen in qualitativer (Schwingungsdauer) oder quantitativer (Schwingungsamplitude) Hinsicht. Denn es kann, wie schon gesagt, genau dieselbe Strahlung je nach den Umständen uns bald diese, bald jene Farbe erwecken, und andererseits kann unter der Wirkung ganz verschiedener Strahlungen genau dieselbe Farbe gesehen werden, wofür später noch zahlreiche Beispiele anzuführen sein werden.

Da der Sehende meist nicht genauer auf die Farben als solche, sondern nur auf die Dinge achtet, welche ihm als Träger der Farbe erscheinen, so fehlt den Meisten die unerlässliche Vorbedingung für ein entgegenkommendes Verständnis einer systematischen Farbenanalyse, nämlich die auf eigene, besonders geübte Beobachtung sich gründende Erfahrung. So kommt es z. B., dass es Vielen nicht möglich ist, genauer anzugeben, in welcher Beziehung zwei einander nahe stehende Farben voneinander verschieden sind, auch wenn deren Ungleichheit deutlich bemerkt wird. Die Methoden, mit Hilfe deren eine gegebene Farbe nach allen hier in Betracht kommenden Beziehungen stetig abgeändert oder durch eine zusammenhängende Reihe von Übergängen in eine beliebige andere Farbe übergeführt werden kann, sind nur Wenigen geläufig oder überhaupt zugänglich. Denn es handelt sich bei der Analyse der Farben nicht, wie missverständlich gesagt worden ist, um »innere Anschauung« oder »innere Beobachtung«, sondern im Gegenteil darum, dass man sich Gelegenheit schafft, die Farben, sei es einzeln, sei es zu mehreren nebeneinander vor sich zu sehen und ebenso zum Gegenstande »äußerer« Beobachtung und Vergleichung zu machen, wie andere Außenobjekte der Beobachtung z. B. die F o r m der Sehdinge.

Da alle Einteilungsgründe für die Mannigfaltigkeit der Farben lediglich den letzteren selbst zu entnehmen sind, so dürfen wir auch nicht, wie dies z. B. noch Helmholtz gethan hat, »einfache« und »zusammengesetzte« Farben in dem Sinne unterscheiden, dass wir unter ersteren diejenigen verstehen, welche durch die verschiedenen Arten h o m o g e n e r Strahlungen erweckt werden, unter »zusammengesetzten« aber diejenigen »Farbenempfindungen«, welche uns entstehen, »wenn eine und dieselbe Stelle der Netzhaut gleichzeitig von Licht z w e i e r o d e r m e h r e r e r verschiedener Grade der Schwingungsdauer getroffen wird« (2, S. 275 u. 311). Wenn einerseits jeder Wellenlänge bezw. Schwingungsdauer der Strahlung eine ganz bestimmte Farbe entspräche, wie dies freilich in den Lehrbüchern der Physik meist angenommen wird, und wenn andererseits durch zusammengesetzte Strahlungen nie Farben hervorgerufen würden, welche auch durch einfache Strahlungen veranlasst werden können, so ließe sich die

Einteilung der Farben in die durch einfache und die durch zusammengesetzte Strahlungen hervorgerufenen wenigstens einigermaßen rechtfertigen. Diese Voraussetzungen treffen aber auch nicht entfernt zu.

Wie schon eingangs erwähnt wurde, lassen sich die Farben in zwei große Gruppen scheiden. Rot, Gelb, Grün, Blau und die Übergänge zwischen je zweien dieser Sehqualitäten nannte HELMHOLTZ Farbentöne. Gleichviel ob eine Farbe einen dieser Töne in ausgesprochener Weise oder nur andeutungsweise zeigt, immer können wir dieselbe als eine getönte oder bunte Farbe von jenen Farben unterscheiden, welche keine Spur eines Farbentones zeigen. So erhalten wir also einerseits die Gruppe der getönten oder bunten Farben, andererseits die Gruppe der tonfreien Farben, welche sämtliche schwarze, graue und weiße Farben umfasst. Man hat diese beiden Gruppen seither als farbige und farblose Gesichtsempfindungen unterschieden.

Die Lehre von den tonfreien Farben hat man im engeren Sinne als die Lehre vom Lichtsinne, die Lehre von den bunten Farben als die Lehre vom Farbensinne bezeichnet.

Ich beginne mit der Betrachtung der tonfreien Farben.

§ 9. Die Reihe der tonfreien Farben. Sämtliche tonfreien Farben lassen sich in einer Reihe derart angeordnet denken, dass an den einen Endpunkt das reinste zur Anschauung zu bringende Schwarz, an den andern das reinste uns vorkommende Weiß zu liegen käme, während dazwischen alle möglichen Dunkelheits- bezw. Helligkeitsstufen das Schwarz, Grauschwarz, Schwarzgrau, Grau, Weißgrau, Grauweiß und Weiß sich in stetiger Folge aneinander reihen. Nach ihren beiden Endfarben kann man diese tonfreie Reihe auch als die schwarz-weiße Farbenreihe benennen.

Man lege auf ein Fensterbrett das schönste mattweiße Papier, welches man herstellen kann, und auf das Papier ein auf der einen Seite versilbertes Deckgläschen, welches eine ganz reine Spiegelfläche darbietet. Stellt man sich dann so vor das Fenster, dass sich in dem Deckglase eine gleichmäßig helle Stelle des Himmels für das Auge spiegelt, so sieht man auf dem Papiere ein kleines quadratisches Feld, dessen Weiß noch außerordentlich viel reiner erscheint als das des Papieres, welches man jetzt als ein ins Grau spielendes Weiß bezeichnen wird. Man hat hier den Vorteil, dass, besonders bei nicht genauer Akkommodation, das vom Deckglase gespiegelte Weiß in der Ebene des Papieres und als ein Bestandteil dieser Ebene erscheint, worauf, wie wir sahen, bei der Vergleichung zweier Farben viel ankommt.

Schlägt man mit einem Locheisen in ein weißes Kartenpapier ein Loch mit ganz scharfem, weder aufgeworfenen noch eingedrückten Rande, legt auf ein Fensterbrett einen größeren Spiegel und hält das Papier so zwischen Auge und Spiegel, dass es den Rahmen desselben ganz verdeckt und mög-

lichst gut beleuchtet ist, so sieht man das vom gespiegelten Himmelslicht erleuchtete Loch ebenfalls als ein kleines Feld von schönster Reinheit des Weiß in der mehr graulichweiß erscheinenden Ebene des Papieres.

Es ist bei diesen Versuchen gleichgültig, ob die gespiegelte Stelle des Himmels blau oder gleichmäßig bewölkt ist; man erkennt in dem kleinen weißen Felde das Blau nicht. Selbst ein »tiefblauer« Himmel giebt unter den genannten Umständen ein Weiß von überraschender Reinheit.

Will man sich auch noch alle Zwischenfarben zwischen dem an der Stelle des Deckglases oder Loches erscheinenden reinen Weiß und dem schon etwas graulichen Weiß des Papieres zur Anschauung bringen, so nimmt man das in § 16 beschriebene kleine Polariphotometer vor das Auge, nachdem man den Nicol desselben zunächst auf 0° eingestellt hat. Man sieht jetzt das kleine rein weiße Feld fast ebenso wie zuvor; dreht man aber den Nicol, so verliert das Weiß mehr und mehr von seiner anfänglichen Reinheit, bis es schließlich unterschiedslos in dem minder reinen Weiß des Papiers verschwindet. Dass daneben ein zweites Bild des kleinen Feldes sichtbar ist, welches umgekehrt bei der Drehung des Nicol immer reiner weiß wird, ist hier gleichgültig. Wer sich gewöhnt hat, alle Farben, welche man als weiß zu bezeichnen pflegt, zusammenzuwerfen, ihnen allen dieselbe Qualität zuzuschreiben und nur verschiedene »Intensitätsstufen« dieser Qualität gelten zu lassen, wird sich auf die beschriebene Weise anschaulich machen können, dass die verschiedenen Stufen der Reinheit des Weiß sich auch als verschiedene Qualitäten auffassen lassen, und verstehen, was unter verschiedener Qualität der weißen Farben gemeint ist.

In anderer, von der oben beschriebenen grundsätzlich verschiedenen Weise kann man sich die Abwandlung eines gegebenen Weiß einerseits nach reineren Stufen des Weiß, andererseits nach dem Grau hin veranschaulichen, wenn man durch ein in der Mitte eines größeren weißen Kartenblattes befindliches Loch von 1—2 cm Durchmesser nach einem, dem ersteren ganz gleichen, z. B. auf dem Fensterbrett horizontal liegenden Kartenblatt von oben hinabblickt. Hält man das gelochte Blatt zunächst ebenfalls horizontal und so, dass es das darunter liegende nicht beschattet, so erscheint das Loch als ein kleines Feld von genau oder sehr angenähert demselben Weiß wie seine Umgebung. Dreht man aber das gelochte Blatt langsam um eine horizontale Achse mit seinem dem Fenster zugewandten Rande nach unten, so wird die Farbe des kleinen Lochfeldes, dessen Lichtstärke dabei ganz ungeändert bleibt, immer graulicher und schließlich sogar schwärzlichgrau; dreht man dagegen das gelochte Blatt in der entgegengesetzten Richtung, so wird die Farbe des kleinen Feldes immer reiner weiß. Der ganze Farbenwechsel des Loches ist dabei auffallend groß, und man kann sich auf diese Weise alle Zwischenfarben zwischen einem ziemlich dunklen Grau und einem relativ sehr hellen reinen Weiß

nacheinander vorführen. Auf die Änderungen, welche bei diesem Versuche die Farbe des gelochten Blattes selbst erfährt, kommt hier nichts an, es handelt sich nur um die Änderung der Farbe des dem Loche entsprechenden kleinen Feldes.

Eine ganz ähnliche Abwandlung eines Weiß nach einem reineren Weiß bezw. nach einem Grau hin lässt sich erzielen, wenn man das gelochte Blatt horizontal an einem Stativ befestigt, welches z. B. auf einem Sessel steht, während man ein zweites ganz gleiches aber ungelochtes Blatt so unter das gelochte hält oder halten lässt, dass es von letzterem nicht beschattet wird. Hat das untere Blatt dabei zunächst ebenfalls die horizontale Lage, so erscheint das Lochfeld nahezu oder ganz gleich der übrigen Fläche des gelochten Blattes. Lässt man aber das untere Blatt langsam in ganz ähnlicher Weise drehen, wie beim vorigen Versuche das obere, so sieht man das Weiß des Lochfeldes je nach der Richtung der Drehung entweder immer reiner weiß oder immer graulicher und schließlich sogar schwarzgrau werden.

Hierbei wird die Änderung der Farbe des kleinen Feldes durch Veränderungen der Stärke der von dem unteren beweglichen Blatte ausgesandten Strahlung herbeigeführt, bei dem vorhergehenden Versuche aber blieb diese Strahlstärke ganz unverändert und die Farbenänderung des kleinen Feldes wurde lediglich durch Änderung der Strahlstärke des oberen beweglichen Blattes bewirkt. Nach einer noch vielfach üblichen unzutreffenden Auffassung des Sachverhaltes würde die Farbenänderung des Loches bei dem einen Versuche als eine objektive, bei dem anderen als eine subjektive zu bezeichnen sein. Hier kommt es zunächst nur darauf an, sich zu veranschaulichen, wie ganz dieselbe Abwandlung der Farbe eines weißen Feldes durch zwei grundverschiedene Mittel erzielt werden kann, und dass die Farbenänderungen bei beiden Versuchsweisen mit genau demselben unausweichlichen Zwange erfolgen, daher es ganz gleichgültig ist, ob der Beobachter sich über die physikalischen Bedingungen des Versuches klar ist oder nicht. Der Physiker sieht bei dem erstbeschriebenen Versuche trotz seiner Überzeugung von der unveränderten Lichtstärke des kleinen Feldes die Farbenänderungen desselben ebenso wie das unerfahrene Kind, und alle Reflexionen und Urteile über den Zusammenhang der Erscheinungen ändern hier nichts Wesentliches an dem, was bei dem Versuche gesehen wird.

Aus den beiden hier nebeneinander gestellten Versuchen geht zugleich hervor, wie einseitig man verfährt, wenn man das Grau als ein Weiß von geringer Strahlstärke, als ein »lichtschwaches Weiß« (2, S. 324) definiert. Von zwei nebeneinander in derselben Ebene erscheinenden Feldern wird bei gleicher Empfindlichkeit der bezüglichen Teile des somatischen Sehfeldes das lichtschwächere allerdings minder rein weiß bezw. grau erscheinen,

wenn das lichtstärkere weiß erscheint; aber bei genau derselben Strahlstärke kann ein kleines Feld auch bei Ausschluss jeder »Ermüdung« der bezüglichen Sehstelle je nach den Nebenumständen bald weiß, bald grau, bald sogar schwarz gesehen werden. Die Strahlstärke des Feldes ist eben nur einer der verschiedenen Faktoren, welche die Farbe desselben bestimmen.

Wir haben soeben gesehen, dass es eine ganze Reihe stetig ineinander übergehender Farben giebt, für welche wir den Sammelnamen Weiß benutzen; beginnend mit dem reinsten Weiß, welches wir uns zur Anschauung bringen können, erstreckt sich diese Reihe durch immer weniger reine und dem Grau ähnlicher werdende Farben bis in jene Gegend der tonfreien Farbenreihe, welche wir bereits nicht mehr als weiß, sondern als grauweiß, weißgrau oder hellgrau bezeichnen. Es ist selbstverständlich innerhalb gewisser Grenzen der Willkür anheimgegeben, welche Farben wir hierbei noch als weiß und welche wir bereits als graulich benennen wollen.

Ein gegebenes grauweißes Feld lässt sich nun in ganz analogen Versuchen, wie ich sie soeben für das Weiß beschrieben habe, durch immer minder weißliche Stufen hindurch in Farben überführen, für welche die Bezeichnung weißlichgrau nicht mehr, und die Bezeichnung schwärzlichgrau noch nicht passend, vielmehr die Bezeichnung grau schlechtweg am angemessensten erscheint. Wieder bilden diese Farben eine ganze Reihe, welche weiterhin in die schon deutlich schwärzlichen Stufen des Grau übergeht, bis wir zur Reihe jener Farben gelangen, welche wir unbedenklich bereits als schwarz bezeichnen. An das Ende der ganzen Reihe gehört dann das reinste Schwarz, welches wir uns anschaulich zu machen vermögen.

Solch tiefes Schwarz sehen wir z. B., wenn wir in ein mattschwarzes steifes Blatt oder in eine mit schwarzem Samt oder Wollpapier überzogene Papptafel ein Loch von mehreren Centimetern Durchmesser schlagen, das Blatt oder die Pappe als festschließenden Deckel eines tiefen, mit schwarzem Samt ausgeschlagenen Kastens benutzen und denselben in einem gut beleuchteten Zimmer aufstellen. Das Loch eines solchen Dunkelkastens, wie ich ihn im Folgenden kurz nennen will, erscheint dann, besonders auf den ersten Blick, in einem tiefen, ganz auffallend reineren Schwarz, als das schwarze Papier oder der schwärzeste Samt, auch wenn letzterer so gebürstet und mit seinen Fasern gegen das Fenster so orientiert ist, dass er möglichst wenig Licht zurückwirft. Im Vergleich mit dem Schwarz des Loches erscheint der Samt selbst unter den günstigsten Umständen noch mit einem deutlichen Stich ins Grau. Ist das Loch nicht zu groß, so kann man sich mit Hilfe des Polariphotometers in der oben beschriebenen Weise auch noch die ganze Reihe von Zwischenfarben zwischen dem tiefen Schwarz des Loches und dem minder reinen Samtschwarz zur Anschauung bringen.

Bei alledem habe ich vorausgesetzt, dass man den Samt aus einer Entfernung betrachtet, welche die Wahrnehmung seiner Fasern ausschließt.

Das Schwarz ist ebenso eine Sehqualität wie jede andere Farbe, und wenn man die letzteren Empfindungen nennt, so muss man auch das Schwarz als eine Empfindung gelten lassen. »Wir unterscheiden,« sagte schon Helmholtz, »die Empfindung des Schwarz deutlich von dem Mangel aller Empfindung.« »Hinter unserem Rücken« sehen wir kein Schwarz, sondern sehen wir überhaupt nicht. Dass wir aber ein tiefes Schwarz nur dann sehen, wenn das Gesichtsfeld im übrigen gut beleuchtet ist, hat Helmholtz dabei nicht erwähnt.

Es giebt freilich keine schwarzwirkenden Strahlungen, wie es weiß- oder rotwirkende giebt; wenn man aber nur diejenigen Phänomene des Gesichtssinnes als »Empfindungen« gelten lassen wollte, welche unter der unmittelbaren Wirkung der Lichtstrahlen entstehen, so dürfte, wie wir sehen werden, eine große Mannigfaltigkeit von Gesichtserscheinungen, welche man jetzt unbedenklich als Empfindungen zu bezeichnen pflegt, diesen Namen nicht mehr führen. Alle Farben sind für den Physiologen Erscheinungen, nach deren physiologischem Korrelat er zu suchen hat, das Schwarz ebenso wie das Weiß oder das Rot.

Man sollte auch nicht, wie dies noch Helmholtz that, sagen: »einen Körper, der kein Licht reflektiert, wenn solches auf ihn fällt, nennen wir schwarz.« Denn ganz abgesehen davon, dass wir uns einen solchen Körper zwar denken können, dass aber bis jetzt keiner aufzeigbar ist, so könnte jene Bemerkung ein grobes Missverständnis herbeiführen, weil ein Körper eine relativ große Lichtmenge in unser Auge schicken und doch schwarz erscheinen kann.

Man betrachte eine mit aller Sorgfalt berußte Fläche, das Prototyp einer schwarzen Fläche für den Physiker, durch eine mit schwarzem Samt ausgekleidete Röhre mit kleiner unterer Öffnung bei guter Beleuchtung, und man wird das durch das offene Ende der Röhre sichtbare Feld grau oder sogar weißlichgrau sehen, und zwar schon beim ersten Hineinschauen. Nach längerem Augenschluss kann es sogar weiß gesehen werden. Der Physiker mag dasjenige schwarz nennen, was seines Wissens möglichst wenig Licht zurückwirft, für den Sinnesphysiologen aber ist nur das schwarz, was er schwarz sieht, mag es viel oder wenig Licht ins Auge schicken.

Bei geschlossenem und vor jedem Lichteinfall geschützten Auge, sowie in einem ganz lichtlosen Dunkelzimmer sieht man kein auch nur angenähert reines Schwarz. Man stelle sich in einem gut beleuchteten Zimmer vor den oben erwähnten Dunkelkasten, schließe und verdecke die Augen so lange, bis jede Spur der meistens, wenn auch nur undeutlich, zurückbleibenden Nachbilder verschwunden ist, und gebe sich Rechenschaft von dem, was man jetzt sieht. Dann öffne man die Augen und richte sie auf

das Loch des Dunkelkastens, so wird man den großen Unterschied zwischen der Farbe des Sehfeldes bei geschlossenem Auge und dem viel tieferen Schwarz des Loches leicht erkennen.

Ein tiefes Schwarz entsteht nur, wenn gleichzeitig andere und insbesondere benachbarte Teile des Sehfeldes weiß oder grau erscheinen, und daher um so mehr, je stärker bis zu einer gewissen Grenze das Gesichtsfeld beleuchtet ist.

Wenn man in einer mondscheinlosen Winternacht bei eben erst beginnender Morgendämmerung erwacht, so bemerkt man unter den noch kaum unterscheidbaren Teilen des Sehfeldes keineswegs auch schwarze, sondern alles erscheint zunächst in einem stellenweise etwas weißlicheren, stellenweise etwas schwärzlicheren Grau. Erst in dem Maße als die Beleuchtung wächst und einzelne Teile des Sehfeldes eine immer deutlichere Weißlichkeit gewinnen, werden gleichzeitig andere immer schwärzlicher, bis endlich sowohl Weiß als Schwarz reiner hervortreten. Selbst die tiefste Nacht ist für uns nicht schwarz, sondern grau, und erst der aufgehende Tag scheidet für unser Auge Licht und Finsternis und zeigt uns neben dem Hell das Dunkel, neben dem Weiß das Schwarz. Die herrschende Ansicht, nach welcher mit wachsender Lichtstärke eines Außendinges und seines Netzhautbildes notwendig auch die »Stärke« der entsprechenden »Lichtempfindung«, das soll heißen, die Helligkeit oder Weißlichkeit der korrelativen Stelle des Sehfeldes wachsen müsse, gehört zu jenen Vorurteilen, welche dem Verständnis der Thatsachen des Gesichtssinnes ganz besonders hinderlich sind. —

Alle grauen Farben sind untereinander insofern verwandt, als sie gleichzeitig an Schwarz und an Weiß erinnern; ein dunkles Grau erscheint dem Schwarz ähnlicher als dem Weiß, ein helles Grau dem letzteren ähnlicher als dem Schwarz, ein zwischen diesen beiden Grau liegendes kann zweifelhaft lassen, ob es dem Weiß oder dem Schwarz ähnlicher ist. In diesem Sinne können wir sagen, jedes Grau sei zugleich weißlich und schwärzlich, bald mehr das eine, bald mehr das andere, oder im besonderen Falle, es sei beides in ungefähr gleichem Maße. Sehen wir zwei verschieden reine Schwarz nebeneinander, so erinnert das minder reine mehr oder weniger an Grau und also mittelbar an Weiß, und Analoges gilt von zwei verschieden reinen weißen Farben. Gehen wir vom schwarzen Ende der tonfreien Farbenreihe nach dem Weiß hin, so sehen wir die Schwärzlichkeit der Farbe immer mehr abnehmen, bis im reinsten Weiß die letzte Spur von Schwärzlichkeit verschwindet. Durchlaufen wir die Reihe umgekehrt vom weißen nach dem schwarzen Ende hin, so sehen wir ebenso die Weißlichkeit der Farbe stetig abnehmen und schließlich verschwinden.

Wir finden also in der ganzen Reihe nur zwei variable Merkmale oder Eigenschaften, nämlich die Schwärze und die Weiße. Habe ich zwei verschiedene tonfreie Farben vor mir, so vermag ich ihre Verschiedenheit dadurch zu kennzeichnen, dass ich sage, die eine sei etwas bezw. viel schwärzlicher als die andere, oder die eine sei etwas bezw. viel weißlicher als die andere. Freilich hat jedes bestimmte tonfreie Grau seine Qualität für sich und ist weder weiß noch schwarz; es handelt sich aber hier nur um die verschiedenen Grade der Ähnlichkeit mit dem reinsten Schwarz einerseits, dem reinsten Weiß andererseits. So kann man auch, wenn man durch einen Punkt einer vertikalen Ebene beliebig viele gerade Linien gelegt denkt, sagen, die Richtung einer um 20° von der Vertikalen abweichenden Geraden sei der vertikalen Richtung ähnlicher als der horizontalen, und die Richtung einer um 45° geneigten Geraden sei der horizontalen ebenso ähnlich oder verwandt wie der vertikalen, sie habe ebensoviel vom Charakter der einen wie der anderen, ebensoviel Horizontalität wie Vertikalität. Der Einwand, dass eine Richtung doch nicht zugleich vertikal und horizontal sein könne, dass sie stets einfach und nicht aus zwei Richtungen zusammengesetzt sei, wäre hier ebensowenig am Platze wie der, dass ein Grau nicht zugleich weiß und schwarz sein könne, und dass es eine einfache und keine zusammengesetzte Empfindung sei.

Wenn man, wie dies auch jetzt noch vielfach geschieht, die qualitative Verschiedenheit der tonfreien Farben nicht gelten lassen und hier nur verschiedene Intensitätsstufen einer einzigen Qualität, d. h. der »weißen Empfindung«, annehmen will, so kann man nur von stärkerem und schwächeren Weiß sprechen und muss jedes Schwarz, welches noch nicht das allerreinste und allerdunkelste ist, als ein schwächstes Weiß bezeichnen. Wer sich so ausdrückt, denkt dabei gar nicht eigentlich an das, was er sieht, sondern an ein sogenanntes weißes Strahlgemisch, das zu schwach ist, um mehr zu bewirken als eine minimale Aufhellung d. i. Weißung jenes absoluten Schwarz, welches er sich entweder als die eigentliche Grundfarbe des Gesichtsfeldes bezw. des ganzen Weltraumes, oder aber als die, einem absoluten Ruhezustande des inneren Auges entsprechende Farbe des Sehfeldes vorstellt. Wäre eine solche Auffassung überhaupt zulässig, so würde sich doch eine qualitative Verschiedenheit der einzelnen tonfreien Farben insofern ergeben, als das, einer absoluten Strahlenlosigkeit des Gesichtsfeldes oder aber einer absoluten Ruhe des inneren Auges vermeintlich entsprechende Schwarz doch nur in dem Maße in der Anschauung zurücktreten könnte, als die »Intensität der Empfindung« sich steigert und also das Weiß hervortritt.

Die Auffassung der verschiedenen tonfreien Farben als bloßer Intensitätsstufen einer und derselben Sinnesqualität hat sich einerseits daraus entwickelt, dass die helleren Farben im allgemeinen aufdringlicher sind als

die dunkleren, was später zu erörtern sein wird, andererseits aus der begrifflichen Vermengung der Farbe mit dem physikalischen Agens, durch welches ihr Erscheinen zumeist veranlasst wird. Alle Energien der Außenwelt, welche, auf unsere Sinnesorgane wirkend, die bezüglichen Sinnesqualitäten in unser Bewusstsein treten lassen, hat die Wissenschaft in ihrer Kindheit mit demselben Namen belegt, welchen bereits jene Sinnesqualitäten führten. Eine Flüssigkeit, welche sauer schmeckt, nannte man eine Säure; das Agens, welches uns Wärmegefühl erzeugt, nannte man Wärme, und die Strahlungen, welche, auf unser Auge wirkend, Licht und Farben des Sehfeldes veranlassen, nannte man Licht. Die Geschichte der Physik ist zugleich eine Geschichte des Kampfes mit den Vorurteilen, welche aus dieser sprachlichen Identifizierung der Sinnesqualitäten mit ihren physikalischen Ursachen entsprangen. Zu diesen Vorurteilen gehörte auch dieses, dass alle jene Verschiedenheiten der Farbe, welche durch bloße Intensitätsverschiedenheiten der auf das Auge wirkenden Strahlung bedingt sind, ebenfalls bloße Intensitätsverschiedenheiten einer und derselben Empfindungsqualität seien.

Diese Auffassung fand weitere Nahrung in folgendem Umstande: Sobald die ins Auge fallende Strahlung eine gewisse, von dem jeweiligen Zustande des Sehorgans mit abhängige Intensitätsgrenze überschreitet, erzeugt sie lästige oder sogar schmerzhafte Empfindungen, welche jedoch, da sie neben der eigentlichen optischen Sinnesqualität bestehen und nicht Merkmale dieser selbst sind, auch nicht als Eigenschaften der eben gesehenen Farbe bezw. der die Farbe tragenden Raumgebilde und also überhaupt nicht als etwas außer uns Vorhandenes aufgefasst werden. Diese Empfindungen nun werden mit wachsender Intensität der Strahlung ebenfalls immer stärker, d. h. lästiger, schmerzlicher und ausgebreiteter, was wir ganz unmittelbar und ohne jede Kenntnis des zu Grunde liegenden physikalischen Vorganges auf die zunehmende Stärke eines auf uns wirkenden äußeren Reizes beziehen. Die Farben an sich aber werden, da wir sie lediglich als Eigenschaften des im Sehfelde Unterscheidbaren nehmen, von dem Unbefangenen gar nicht als die Folgen eines ihn treffenden äußeren Reizes aufgefasst. Ein Mensch, der von Strahlungen oder Ätherwellen noch nichts weiß, nimmt auch eine Flamme, solange er sie nur sieht, nicht als etwas auf ihn Wirkendes, sondern lediglich als etwas im Außenraum Vorhandenes; ist er jedoch der Flamme so nahe, dass sie ihm Wärmegefühl erzeugt, so nimmt er dieses Gefühl als eine Wirkung der Flamme und also die letztere als etwas auf seine Haut Wirkendes; und das Analoge gilt, wenn ihn die Flamme blendet und sein Auge belästigt. Solange eine Strahlung nur Farbe, also nur eine optische Sinnesqualität z. B. Weiß erzeugt, ist letzteres für den nicht weiter Unterrichteten nur ein Bestandteil seiner optischen Außenwelt, nicht aber ein Agens, eine Kraft, ein Reiz,

die auf ihn wirken und seinen Empfindungszustand mehr oder weniger ändern.

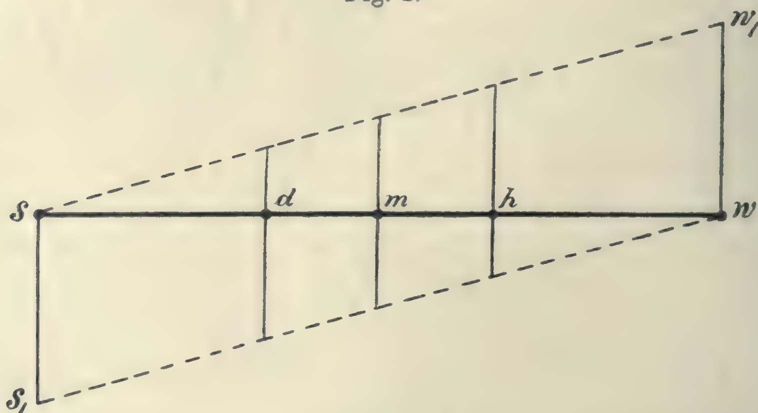
Es scheint mir daher unrichtig, wenn Helmholtz (2, S. 441—443) die »Empfindung der Helligkeit« auf den »Lichtschmerz« zurückführen will, welcher, wie er meint, »wohl ausnahmslos eine gleichzeitig vorhandene Lichtempfindung begleitet«. Auf diese Weise lässt sich seine Ansicht, nach welcher die verschiedenen Helligkeitsgrade der tonfreien Farben bloße Intensitätsstufen einer und derselben Sinnesqualität sein sollen, gegenüber der seinerzeit von mir entwickelten Auffassung nicht rechtfertigen.

§ 10. Symbolische Bezeichnung der tonfreien Farben. In dem Maße als sich die Beschaffenheit einer tonfreien Farbe der Beschaffenheit des reinen Weiß nähert, entfernt sie sich zugleich von der des reinen Schwarz, je größer ihre Ähnlichkeit mit dem ersteren ist, desto kleiner ihre Ähnlichkeit mit dem letzteren. Daher ist jede tonfreie Farbe charakterisiert durch das Verhältnis, in welchem diese beiden Ähnlichkeiten zueinander stehen, und wenn wir die Größe ihrer Ähnlichkeit mit dem reinen Schwarz, d. i. ihre Schwärzlichkeit oder Schwärze, durch das Zeichen S, die Größe ihrer Ähnlichkeit mit dem reinen Weiß, d. i. ihre Weißlichkeit oder Weiße, durch das Zeichen W ausdrücken, so ist das Verhältnis $\frac{W}{S}$ oder $\frac{S}{W}$ ein Symbol für die Qualität der bezüglichen Farbe. Dass hier diese Symbole keinen »Bruch« und also in keiner Weise eine Größe bezeichnen, sondern lediglich ein Verhältnis, braucht wohl kaum besonders bemerkt zu werden; die Symbole $\frac{W}{S}$ und $\frac{S}{W}$ sind daher durchaus gleichbedeutend. Nicht als ob wir beim Sehen der Farbe die beiden Glieder dieses Verhältnisses sondern und die gesonderten untereinander vergleichen würden: wir sehen vielmehr nur eine bestimmte Qualität, ohne uns dabei des Verhältnisses ihrer Ähnlichkeiten mit dem reinen Weiß und Schwarz besonders bewusst zu werden. Gleichwohl leitet uns dieses Verhältnis bei der Wahl der Bezeichnung für die verschiedenen tonfreien Farben; wir nennen ein Grau schwärzlich, wenn es dem Schwarz ähnlicher oder näher verwandt erscheint als dem Weiß, und weißlich, wenn das Gegenteil der Fall ist.

Wie wir ferner bildlich sagen können: je näher eine Farbe dem reinen Weiß steht, desto ferner steht sie dem reinen Schwarz, so können wir uns auch auf der Strecke $s\,w$ (Fig. 2), wenn wir deren Endpunkt s als Symbol des allerdings nur gedachten und nie mit Sicherheit anschaulich zu machenden absoluten Schwarz, den Endpunkt w als Symbol des ebenfalls nur gedachten absoluten Weiß nehmen, sämtliche tonfreie Farben derart angeordnet denken, dass mit dem Abstande von s die Schwärzlichkeit der Farben stetig ab-, die Weißlichkeit stetig zunimmt, und zwar beides derart, dass gleichen

Zuwüchsen der Weißlichkeit bezw. der Schwärzlichkeit gleichgroße Lagenunterschiede auf der Strecke sw entsprechen. Wie nun jedem Orte innerhalb der Strecke sw ein bestimmtes Verhältnis

Fig. 2.



seiner beiden Abstände von s einerseits und von w andererseits entspricht, so auch jeder tonfreien Farbe ein bestimmtes Verhältnis zwischen ihrer Weißlichkeit und ihrer Schwärzlichkeit. Wenn also die Weißlichkeit der durch die Strecke sw repräsentierten Farben proportional ihrem Abstande von s, ihre Schwärzlichkeit proportional ihrem Abstande von w wächst, so ließe sich die Qualität jeder einzelnen Farbe durch das Verhältnis dieser beiden Abstände ausdrücken. Die im Punkte d (Fig. 2) liegende Farbe z. B. wäre durch das Streckenverhältnis $\frac{sd}{wd}$ oder $\frac{wd}{sd}$ gekennzeichnet, welches zugleich das Verhältnis der dem Punkte d entsprechenden Ordinaten der beiden parallelen Geraden sw_1 und $s_1 w$ ist.

Wollten wir einseitig verfahren und nur die Weißlichkeit der Farbe zur Grundlage ihrer Bezeichnung machen, so zeigt uns die soeben erörterte schematische Anordnung der tonfreien Farben die theoretische Möglichkeit, die Qualität jeder beliebigen tonfreien Farbe auch durch eine Zahl zu bezeichnen. Geben wir nämlich dem Abstande des absoluten Weiß vom absoluten Schwarz, welcher Abstand also dem denkbaren Maximum der Verschiedenheit zweier tonfreien Farben entspricht, beispielsweise den Wert 2, so entspricht dem Werte 1 das in der Mitte der schematischen Farbenreihe liegende Grau (m Fig. 2), welches dem absoluten Schwarz ebenso ähnlich ist, wie dem absoluten Weiß bezw. von beiden gleichstark verschieden ist; dem Werte 0,33 . . . ein Dunkelgrau (d Fig. 2), dessen Weiße sich zur Schwärze verhält wie 1 : 2; dem Werte 1,33 . . . ein Hellgrau, dessen Weiße sich zur Schwärze verhält wie 2 : 1 u. s. f. Der numerische Ausdruck für die Weißlichkeit einer tonfreien Farbe F ergäbe sich also aus dem ihr entsprechenden Verhältnis $W : S$ nach der Formel $F = \frac{W}{W+S}$.

Der wesentliche Unterschied dieser Art, die Weißlichkeit oder Helligkeit einer tonfreien Farbe numerisch definiert zu denken, von derjenigen, welche

sich aus der Auffassung dieser Farben als bloßer Intensitätsstufen einer und derselben Sehqualität ergiebt, liegt darin, dass wir für die Größe der Farbenverschiedenheit zwischen dem Nullpunkt und dem Maximum der Weißlichkeit oder Helligkeit einen endlichen Wert einsetzen und mit demselben das absolute Weiß bezeichnen, während diesem nur gedachten Weiß, wenn es als Intensitätsstufe und daher als das absolute Maximum der Intensität angenommen wird, der Wert ∞ zukommen würde.

Zwischen 0 und 1 liegt dieselbe Menge numerisch ausdrückbarer Verhältnisse wie zwischen 1 und ∞, denn jedem diesseits 1 gelegenen entspricht jenseits 1 das umgekehrte Verhältnis. So liegen auch auf der ideellen Farbenlinie (Fig. 2) zwischen dem absoluten Schwarz (s) und dem mittleren Grau (m) ebensoviel verschiedene Farben, wie zwischen letzterem und dem absoluten Weiß (w).

Die tonfreie oder schwarz-weiße Farbenreihe ist vergleichbar der Gesamtheit aller Gemische, welche sich aus zwei, in jedem beliebigen Verhältnis mischbaren Dingen herstellen lassen: beide stellen eine eindimensionale Mannigfaltigkeit dar, und in der Mannigfaltigkeit der tonfreien Farben sind in solchem Sinne reines Weiß und Schwarz die beiden Variablen oder Mischelemente. Ich habe jedoch Leser gefunden, welche von einem Gemisch verlangten, dass jeder seiner Bestandteile als solcher im Gemisch fortbestehe bezw. aufzeigbar sei. Nun ist freilich richtig, dass jemand, der nie ein Schwarz oder Weiß gesehen hätte, auch in einem Grau nie etwas Schwärzliches oder Weißliches finden würde, während er in einem Gemisch von Linsen und Bohnen beide finden würde, auch wenn er sie nie gesondert gesehen hätte. Jedes Gleichnis hinkt, aber es ist das gesunde Bein, auf welchem es fußt, nicht das kranke.

§ 11. Vergleichung von Farbenverschiedenheiten untereinander. Auf einer in der beschriebenen Weise geordneten ideellen Farbenreihe oder Farbenlinie würde der gegenseitige Abstand zweier Farben zugleich ein Maß ebensowohl für die Verschiedenheit wie für die Ähnlichkeit derselben sein, denn die Größe ihrer Verschiedenheit wäre direkt proportional, die Größe ihrer Ähnlichkeit umgekehrt proportional ihrem gegenseitigen Abstande; Farbenpaare von gleichgroßer Verschiedenheit ihrer beiden Einzelfarben, kurz gesagt äquidifferente Farbenpaare, gleichviel welcher Teilstrecke der Farbenreihe sie angehören, ob der schwarzen, der grauen oder der weißen, würden Farbenpaare von gleichgroßem Abstand ihrer beiden Einzelfarben in der Farbenreihe sein; einer doppelt so großen Verschiedenheit entspräche ein doppelt so großer Abstand der bezüglichen Orte in der Reihe u. s. w. Man brauchte also nur den gegenseitigen Abstand zweier beliebig gewählter Farben der Reihe als Maßeinheit zu nehmen, um für die Verschiedenheit zweier beliebiger anderer Farben ein durch Zahlen ausdrückbares Maß zu erhalten.

Da das für die Endpunkte einer solchen schematischen Farbenreihe angenommene absolute Weiß und Schwarz nicht aufzeigbar und nur Gedankendinge sind; da ferner eine und dieselbe Strahlung je nach den Nebenumständen in sehr verschiedenen tonfreien Farben gesehen werden

kann, und wir nicht im stande sind, diese Nebenumstände derart konstant zu erhalten, dass mit der bestimmten Strahlung auch immer dieselbe Farbe wiederkehren müsste: so wäre es schon aus diesen beiden Gründen unmöglich, die oben angenommene ideelle Farbenreihe z. B. durch eine entsprechende Reihe tonfreier Pigmente für das Auge in korrekter Weise zu verwirklichen, und zwar auch dann unmöglich, wenn für eine ganz konstante Beleuchtung derselben gesorgt wäre. Die Bedeutung einer solchen nur gedachten Reihe der tonfreien Farben liegt also nur darin, dass man sich an derselben klar machen kann, inwiefern man an die Verschiedenheit zweier tonfreien Farben eine Art Maß anzulegen vermag.

Haben wir z. B. im Sehfelde drei tonfreie Farben f_n, f_o, f_p nebeneinander vor uns, von denen f_o weißlicher als f_n, aber minder weißlich als f_p ist, und finden wir die Verschiedenheit von f_n und f_o entschieden größer als die von f_o und f_p, so vermögen wir gleichwohl nicht zu sagen, um wieviel diese Verschiedenheit größer ist als die andere. Wohl aber kann der Fall eintreten, dass es uns nicht möglich ist, mit Bestimmtheit zu sagen, die eine Verschiedenheit sei größer als die andere, dass wir also beide beiläufig gleich finden.

Angenommen nun, man hätte eine sehr große Anzahl kleiner Täfelchen zur Verfügung, deren tonfreie Farben sich in äußerst feinen Abstufungen von einem möglichst dunklen Schwarz bis zu einem möglichst hellen Weiß erstrecken, und man hätte zunächst z. B. zwei graue, ganz deutlich, aber nicht allzusehr verschiedene Täfelchen f_n und f_o nebeneinander gelegt, von welchen f_o das lichtstärkere wäre, so könnte man ein drittes noch lichtstärkeres Täfelchen f_p aussuchen, welches neben f_o gelegt von diesem beiläufig ebenso verschieden erscheint, wie f_o von f_n, sodann ein viertes abermals lichtstärkeres f_q, welches neben f_p gelegt wieder von diesem ebenso stark abzustechen scheint, wie f_p von f_o, und so fort, solange man noch passende, immer lichtstärkere Täfelchen fände. In analoger Weise könnte man auf der anderen Seite von f_n immer lichtschwächere Täfelchen f_m, f_l, f_k . . . . anreihen, bis zum lichtschwächsten noch eben passenden, welches zu finden wäre. Würde der Grund, auf welchem man die Täfelchen geordnet hat, überall ganz gleich sein, die Beleuchtung ganz konstant bleiben, und auch die Stimmung des Auges während des ganzen Versuches sich nicht wesentlich ändern, würden endlich die Täfelchen behufs der Vermeidung des Grenzkontrastes (s. u.) nicht dicht aneinander gelegt, sondern je ein schmaler und überall gleichbreiter Streifen des Grundes zwischen ihnen freigelassen, so würde sich auf diese Weise eine wenigstens einigermaßen beständige Stufenreihe tonfreier Farben herstellen lassen, auf welcher die Verschiedenheit je zweier Nachbarfarben überall angenähert gleichgroß erscheint.

Nimmt man die Größe (den Grad) dieser Verschiedenheit als Maßeinheit

und setzt sie = 1, so würde die Verschiedenheit zweier Farben, welche eine dritte zwischen sich hätten, = 2, die Verschiedenheit zweier Farben, welche *zwei* andere zwischen sich hätten, = 3 zu setzen sein u. s. w. Kurzum die Größe der Verschiedenheit je zweier beliebiger auf einer solchen Farbenskala vertretenen Farben wäre der Zahl der Stufen, welche von der einen zur anderen führt, proportional zu setzen.

Ferner könnte man die Verschiedenheit zweier Nachbarfarben der Skala gleichsam hälften, wenn man ein Täfelchen fände oder herstellte, welches zwischen sie gelegt, von beiden in gleichem Grade verschieden erscheint. Eine so auf den halben Wert gebrachte Verschiedenheit könnte man abermals hälften u. s. w., bis die Verschiedenheit der bezüglichen Täfelchen nur noch eben merklich und also unter den gegebenen Bedingungen nicht weiter teilbar wäre.

In dieser Weise wäre also eine Art Messung der Verschiedenheit zweier tonfreien Farben auf Grund einer bestimmten, als Maßeinheit gewählten Verschiedenheitsgröße durchführbar; mit welchem Grade von Sicherheit oder vielmehr Unsicherheit, kann hier dahingestellt bleiben. *Immer aber würde es sich dabei nur um eine messende Vergleichung von Farbenverschiedenheiten, nicht aber um eine Messung der Farben* selbst handeln; wir könnten die Größe oder den Grad der Verschiedenheit zweier Farben durch eine Zahl ausdrücken, für die Weißlichkeit und Schwärzlichkeit der einzelnen Farbe aber hätten wir keinen zahlenmäßigen Ausdruck gewonnen.

Ein solcher wäre wie schon oben erwähnt nur denkbar, wenn wir die Farbenskala entweder bis zum absoluten Schwarz oder bis zum absoluten Weiß fortzusetzen vermöchten. Aber diese beiden Farben sind wie gesagt nur Gedankendinge, und wieviel äquidifferente Farbenstufen immer wir unter Benutzung aller hier denkbaren Kunstgriffe unserer Skala an beiden Seiten noch anzureihen vermöchten, nie könnten wir behaupten, dass wir mit dem dunkelsten Schwarz, welches wir hergestellt hätten, das dunkelste, für die Anschauung überhaupt *mögliche*, geschweige denn das, nur denkbare, absolute Schwarz erreicht hätten, und ebensowenig würde selbst das hellste von uns erzielte Weiß als das hellste überhaupt mögliche oder gar als das absolute Weiß gelten müssen.

Unserer Farbenskala würden also die beiden Endstrecken und damit einerseits der Nullpunkt der Weißlichkeit, andererseits der Nullpunkt der Schwärzlichkeit fehlen, und wir könnten also auch nicht für eine in unserer Farbenskala vertretene Farbe die Zahl der als Maßeinheiten genommenen äquidifferenten Farbenstufen, welche zwischen sie und das absolute Schwarz zu liegen kämen, als Maß für ihre Weißlichkeit oder Helligkeit, und ebensowenig die Zahl der Farbenstufen, welche sie vom absoluten Weiß trennen, als Maß für ihre Schwärzlichkeit oder Dunkelheit benutzen.

Aber auch wenn wir dies könnten, würden wir abermals nur einer Farbenverschiedenheit Ausdruck geben, nämlich der Verschiedenheit zwischen der bezüglichen Farbe und dem absoluten Schwarz bezw. Weiß. Keineswegs aber dürfte man die Farbe selbst als eine Größe nehmen und meinen, die fragliche Zahl sei ein Ausdruck für diese Größe. Wie der Ort eines Punktes auf einer Geraden selbst keine Größe hat, sondern nur sein Abstand von einem zweiten Orte auf der Geraden quantitativ bestimmbar ist, so hat auch die Farbe als eine bloße Qualität keine Größe oder Intensität, und nur ihre Verschiedenheit von einer anderen Farbe lässt sich quantitativ auffassen.

Da jede im Sehfeld oder Sehraum erscheinende Farbe eine Fläche oder einen Raum füllt und wären dieselben auch noch so klein, so kann man allerdings von der extensiven Größe einer Farbe sprechen; aber das Quantitative liegt hier in der räumlichen Ausdehnung, während die Farbe nur eine Qualität des bezüglichen Flächen- oder Raumteiles ist: die Farben sind sozusagen die Qualitäten des Sehfeldes oder Sehraumes, kurz, die optischen Raumqualitäten.

Wenn ich von zwei tonfreien Farben sage, die eine sei weißlicher als die andere, so nehme ich die Weißlichkeit der Farbe allerdings als etwas Quantitatives, wie ich den Ort als etwas Quantitatives nehme, wenn ich von zwei Orten sage, der eine sei weiter nach rechts als der andere. Ersterenfalls liegt das Quantitative in der mehr oder weniger großen Ähnlichkeit mit reinem Weiß bezw. in der Verschiedenheit von reinem Schwarz, letzterenfalls in dem mehr oder minder großen Abstande von meiner Medianebene oder sonst welcher Ebene, auf welche ich das Links oder Rechts beziehe. Was Fechner und Helmholtz als »Intensität einer Lichtempfindung« bezeichnet haben, entspricht eben der Weißlichkeit derselben. Aber so unzutreffend es wäre, von zwei verschieden weit nach rechts liegenden Punkten zu sagen, der eine sei intensiver als der andere, so unzutreffend ist es, der weißlicheren von zwei Farben eine größere Intensität zuzuschreiben.

Ebenso wie ich die eine von zwei tonfreien Farben als die weißlichere bezeichnen kann, kann ich die andere als die schwärzlichere bezeichnen. Letzterenfalls halte ich mich an die mehr oder minder große Ähnlichkeit der Farben mit dem Weiß, anderenfalls an die Ähnlichkeit mit Schwarz. Das Merkmal der Schwärze ist deutlicher in der einen, das der Weiße deutlicher in der anderen gegeben, und dem entspricht ihre qualitative Verschiedenheit. Gebrauche ich statt der Worte Weißlichkeit und Schwärzlichkeit die Worte Helligkeit und Dunkelheit und bezeichne die weißliche Farbe als die hellere, so liegt das Missverständnis, dass es sich dabei um eine Intensitätsverschiedenheit der beiden Empfindungen handle, um so näher, als sehr gewöhnlich das Wort Helligkeit promiscue sowohl für die Weißlichkeit der »Empfindung« als auch für die Intensität der sie veranlassenden Strahlung benutzt worden ist. Deshalb ist es unzweckmäßig, die Intensität

einer optischen Strahlung als deren Helligkeit zu bezeichnen, vielmehr sollte man dieses Wort nur auf die, durch die Strahlung veranlasste Farbe anwenden.

Der erste, der eine Skala äquidifferenter Farbenstufen herzustellen versuchte, war PLATEAU (7, S. 468). Zu einem weiß- und einem schwarzpigmentierten Quadrate suchte er dasjenige mittelgraue, welches für das Auge von beiden gleichstark verschieden erschien, sodann ein hellgraues, welches von dem weißen, und ein dunkelgraues, welches von dem schwarzen ebenso stark abstach wie von dem mittelgrauen. So erhielt er eine Skala von fünf beiläufig äquidifferenten Farben. Indem er absah von »der kleinen Lichtmenge«, welche von dem schwarzen Quadrate reflektiert wurde, und »von der schwachen Lichtempfindung, welche die Augen selbst im vollständigsten Dunkel wahrnehmen«, setzte er die »Intensität« der dem schwarzen Quadrat entsprechende Empfindung = 0 und die Intensität der dem nächstliegenden dunkelgrauen Quadrate entsprechenden Empfindung = 1 und kam so zu dem Ergebnis, »dass die Intensitäten der den fünf Farben entsprechenden Empfindungen, vom Schwarz bis zum Weiß, sich zueinander verhalten wie 0, 1, 2, 3, 4«, und dass also z. B. das hellgrau erscheinende Quadrat eine »Empfindung hervorbringt, deren Intensität gleich ist drei Vierteln der weißen Empfindung«. Er meint also, dass wenn statt des schwarz bemalten Quadrates »ein ganz lichtleerer Raum genommen würde« und »die schwache Lichtempfindung«, welche nicht von physikalischen, sondern von »physiologischen Aktionen herrührt«, beseitigt werden könnte, das dann gesehene Schwarz dem wahren Nullpunkt der Empfindung entsprechen und das Versuchsergebnis dann noch »ein wenig genauer« sein würde.

Als der erste Versuch einer messenden Vergleichung von Farbenverschiedenheiten schien mir die Untersuchung PLATEAU's hier besonders erwähnenswert; denn thatsächlich handelt es sich dabei um die Messung von Farbenverschiedenheiten, nicht wie PLATEAU meint, um eine Messung der Farben (»Empfindungsintensitäten«) selbst.

Übrigens bezweckte PLATEAU bei seinen Versuchen nicht, wie wir im obigen, eine Untersuchung der Farben und ihrer Verschiedenheiten als solcher, und die Herstellung seiner Farbenskala war ihm nicht Selbstzweck, vielmehr sollte ihm dieselbe nur dazu dienen, ein Gesetz für die Abhängigkeit der »Intensität der Lichtempfindung« von der Intensität der sie erzeugenden Strahlung zu finden, worauf später zurückzukommen sein wird.

PLATEAU hat auch bereits den Vorschlag gemacht, die zu den fraglichen Untersuchungen nötigen tonfreien Farben nicht mit Pigmenten, sondern mit Hilfe des Farbenkreisels herzustellen. Auf seine Anregung hat sodann DELBOEUF (8) diese Methode benutzt, um auf einer Kreisfläche drei konzentrische Ringe von verschiedener Farbe derart herzustellen, dass die Farbe des mittleren Ringes von der Farbe des ihn umschließenden Ringes ebenso stark abwich, wie von der Farbe des von ihm umschlossenen Ringes. Auch diese Versuche bezweckten nur die Auffindung eines Gesetzes der Beziehung zwischen den Lichtintensitäten und den »Empfindungsintensitäten«. Dasselbe gilt von den mit drei nebeneinander rotierenden Kreiseln ausgeführten Untersuchungen von A. LEHMANN und H. NEIGLICK (9).

Zu demselben Zwecke experimentierte EBBINGHAUS (10, S. 1008) wieder mit tonfreien Pigmenten. Er stellte sich eine Stufenreihe von sieben äquidifferenten Farben auf Papierscheiben her, und indem er sich die Mannigfaltigkeit der ton-

freien Farben auf einer Geraden angeordnet und jede einzelne Farbe, wie ich dies seinerzeit gethan hatte (4, § 22), durch einen bestimmten Ort auf dieser Geraden symbolisiert dachte, bezeichnete er seine Farbenskala als eine Reihe »äquidistanter Helligkeiten« und sagt ganz im Sinne dieser Auffassung: »die Anschauung der Helligkeitsdistanzen verhält sich zu derjenigen der einzelnen Helligkeiten sehr ähnlich wie die Anschauung einer räumlichen Strecke zu derjenigen der einzelnen Orte.« Doch hat er später wieder von den einzelnen tonfreien Farben als von verschiedenen »Empfindungsstärken« gesprochen und das, was ich qualitative Verschiedenheiten nannte, als »Stärkeverschiedenheiten der Empfindungen« bezeichnet, weil seiner Ansicht nach »kein Anlass vorliegt, diesen Sprachgebrauch anzutasten« (11, S. 506).

Als eine Reihe äquidifferenter Helligkeiten wollte schon Fechner (12, 1. Teil, S. 158) die Skala der Sterngrößen angesehen wissen, welche die Astronomen lediglich auf Grund des Aussehens der Sterne schon lange vor der photometrischen Untersuchung ihrer Lichtstärken unterschieden haben. Aber obwohl der Gesichtswinkel der Fixsterne gleich Null gesetzt werden kann, erscheinen dieselben doch nicht bloß verschieden hell, sondern auch verschieden groß und zwar auch dann, wenn das Auge auf natürliche oder künstliche Weise für parallele Strahlen möglichst gut eingestellt ist. Hiermit steht auch das von den Astronomen gewählte Wort Sterngröße in Einklang. Wenn dem Auge alle Fixsterne von ganz gleicher Größe oder vielmehr Kleinheit und nur verschieden hell erscheinen würden, was thatsächlich nicht der Fall ist, so würde man wahrscheinlich gar nicht von verschiedener Größe der Sterne gesprochen haben. Bei der Unterscheidung der Sterngrößen kommt also nicht bloß der Lichtsinn, sondern auch der Raumsinn des Auges in Frage, und jedenfalls ist bisher nicht bewiesen worden, dass dieselbe ausschließlich mit Hilfe des Lichtsinns erfolge.

Wie es sich erklärt, dass mit der Lichtstärke der Sterne außer ihrer Helligkeit auch ihre scheinbare Flächengröße wächst, wird später erörtert werden.

§ 12. Die Reihe der Farbentöne. Jede bunte Farbe kann bei gleicher Qualität ihres bunten Merkmals, das ich im Einklang mit Helmholtz als ihren Ton bezeichne, mehr oder weniger weißlich, graulich oder schwärzlich, gleichsam durch Weiß, Grau oder Schwarz in verschiedenem Grade verschleiert oder verhüllt sein. Bunte Farben, welche solche Verhüllung nicht ohne weiteres bemerken lassen, will ich freie Buntfarben (couleurs franches) nennen; diejenigen aber, welche neben ihrem Farbenton eine mehr oder minder deutliche Weißlichkeit, Graulichkeit oder Schwärzlichkeit zeigen, mögen verhüllte heißen.

Die möglichst freien Buntfarben werden gewöhnlich als gesättigte Farben bezeichnet. Da aber seit Helmholtz unter Sättigung auch eine Eigenschaft der bezüglichen Strahlungen verstanden worden ist, da Helmholtz ferner zum Kriterium einer gesättigten Farbe nur das Fehlen einer deutlichen Weißlichkeit oder Graulichkeit, nicht aber auch das Fehlen einer deutlichen Schwärzlichkeit gemacht hat, so werde ich zur Vermeidung von Missverständnissen das Wort »gesättigt« gar nicht gebrauchen. Die klarste Definition eines Wortes nutzt erfahrungsgemäß wenig, wenn dasselbe dem Leser bereits in einer anderen Bedeutung geläufig geworden ist;

unwillkürlich verbindet er immer wieder mit dem Worte die alten Vorstellungen.

Die bunten Farben, mögen sie mehr oder weniger frei sein, lassen sich nach ihrem Farbentone auf einer in sich zurücklaufenden Reihe, einem sogenannten Farbenzirkel, derart geordnet denken, dass die Verschiedenheit des Tones je zweier unmittelbar benachbarter minimal, die Ähnlichkeit maximal ist, so dass die Farbentöne überall stetig ineinander übergehen.

Nehmen wir auf einem solchen Farbenzirkel eine beliebige Farbe als Ausgangspunkt, z. B. ein Rot ähnlich demjenigen, mit welchem ein Spektrum am langwelligen Ende gewöhnlich beginnt, so sehen wir die in der einen Richtung sich anreihenden roten Farben immer deutlicher gelblich werden, während die Rötlichkeit der Farbe entsprechend zurücktritt, bis wir durch Orange und Goldgelb hindurch zu einem Gelb gelangen, welches keine Spur mehr von der noch im Orange so deutlichen Röte zeigt. An dieses Gelb schließen sich andere gelbe Farben an, welche mehr und mehr ins Grün spielen (Schwefelgelb, Kanariengelb); weiterhin tritt (wie im Saftgrün) hinter der immer deutlicher werdenden Grünlichkeit die Gelblichkeit mehr und mehr zurück und wir gelangen endlich zu einem Grün, welches völlig gelbfrei erscheint. Diesem Grün folgen grüne Farben, die bereits ins Blau spielen (Wassergrün), weiter wird die Bläulichkeit der Farben immer stärker, die Grünlichkeit immer schwächer (Wasserblau), bis wir ein Blau erreichen, welches gar keine Grünlichkeit mehr zeigt. An dieses Blau schließen sich blaue Farben von mehr und mehr wachsender Rötlichkeit und entsprechend abnehmender Bläulichkeit an (Blauviolett, Rotviolett, Purpurrot), bis in einem bestimmten Rot die letzte Spur von Bläulichkeit verschwindet. Diesem Rot folgen sodann spurweis gelblich werdende rote Töne, bis wir wieder jenes Rot erreichen, von dem wir ausgingen.

Wie schon aus dieser Beschreibung hervorgeht, finden sich in der zu einem Zirkel geschlossenen Farbentonreihe vier ausgezeichnete Stellen: erstens die Stelle desjenigen Gelb, welches keine Spur von Rötlichkeit mehr zeigt, andererseits aber auch noch keine Spur von Grün erkennen lässt; zweitens die Stelle desjenigen Blau, von dem dasselbe gilt. Diese beiden Farbentöne mögen als Urgelb und Urblau bezeichnet werden. Ebenso können wir drittens dasjenige Rot und viertens dasjenige Grün, welche weder irgend bläulich noch irgend gelblich sind, als Urrot und Urgrün benennen.

Sämtliche Farbentöne lassen sich auf dem Zirkel so ordnen, dass die genannten Urfarbentöne denselben in seine vier Quadranten teilen, wie dies Taf. I anschaulich machen soll. Dieselbe stellt in der unteren Figur einen Farbenzirkel dar, auf welchem allerdings nur eine sehr beschränkte Zahl von bunten, leider zum Teil stark verhüllten Farben wiedergegeben ist, diese jedoch in der, einem idealen Farbenzirkel entsprechenden Folge

der Farbentöne[1]). Man sieht sofort, dass allen auf der linken Hälfte dieses Zirkels liegenden Farben eine mehr oder weniger deutliche Gelblichkeit oder Gilbe, allen auf der rechten Hälfte gelegenen eine mehr oder minder deutliche Bläue gemeinsam ist, während alle der oberen Hälfte angehörenden in verschiedenem Maße der Deutlichkeit grünlich oder grün, alle Farben der unteren Hälfte aber rötlich oder rot sind. Wir unterscheiden dementsprechend eine gelbhaltige und eine blauhaltige, und ebenso eine rothaltige und eine grünhaltige Hälfte des Farbenzirkels.

Jeder Quadrant eines solchen aus möglichst vielen und gleich freien Farbentönen bestehenden Zirkels wird gebildet von den zwischen je zwei Urfarben liegenden Zwischentönen. Greifen wir irgendeine solche Zwischenfarbe, z. B. ein beliebiges Orange heraus und suchen uns klar zu machen, welche Ähnlichkeiten und welche Unterschiede zwischen dem Tone dieses Orange und den nach beiden Seiten angrenzenden Farbentönen bestehen. Ähnlich sind alle Farbentöne dieser kleinen Strecke insofern, als sie erstens alle rötlich und zweitens alle gelblich sind, und zwar nimmt, wenn wir die Farben in der einen Richtung durchmustern, die Röte zu und die Gilbe ab, während in der entgegengesetzten Richtung die Gilbe zu- und die Röte abnimmt. Was die einzelnen Farbentöne dieser Strecke unterscheidet, ist also lediglich das verschiedene Verhältnis der Deutlichkeit ihrer Röte zur Deutlichkeit ihrer Gilbe.

Ganz anders verhält es sich, wenn wir eine Urfarbe, z. B. das Urgelb, mit den sich beiderseits anreihenden Farbentönen vergleichen. Da finden wir, dass die Gilbe, welche im Urgelb am ausgesprochensten ist, nach beiden Richtungen hin abnimmt, und dass dafür in der einen Richtung eine immer deutlicher hervortretende Röte, in der anderen Richtung eine zunehmende Grüne bemerkbar ist. Die nach der einen Seite an das Urgelb grenzenden Farben zeigen also neben ihrer Gilbe eine Eigenschaft, von welcher in den nach der anderen Seite angrenzenden keine Spur bemerklich ist; denn jene spielen ins Grüne, diese ins Rote, und das Urgelb bildet den Wendepunkt, vor welchem die Grünlichkeit aufhört und hinter welchem die Rötlichkeit beginnt. Nur eine bunte Eigenschaft, die Gilbe, ist allen Farben dieser kleinen Strecke gemeinsam, während den Farben einer zwischen zwei Urfarben liegenden Strecke stets zwei bunte Merkmale gemeinsam sind, deren eines in demselben Maße an Deutlichkeit gewinnt, als das andere verliert.

Denkt man sich den beschriebenen Farbezirkel derart gehälftet, dass die Teilungslinie nicht durch zwei Urfarben, sondern zwei beliebige einander

[1]) Die das Urrot und Urgrün vertretenden Farbentöne der Figur haben bei Tageslicht für mein Auge noch einen Stich ins Gelb. Eine größere Freiheit der Farben wäre nur erreichbar gewesen, wenn man auf Lichtbeständigkeit der Pigmente verzichtet hätte.

b

b:r = 0,75:0,25

b:r = 0,5:0,5

b:r = 0,25:0,75

r



Lith. Anst. v. E. A. Funke, Leipzig

Verlag v. Wilhelm Engelmann in Leipzig.

gegenüberliegende Zwischenfarben geht, z. B. durch ein bestimmtes Violett und ein bestimmtes Grün-Gelb, und vergleicht die Farbentöne je einer Hälfte untereinander, so findet man kein allen diesen Tönen gemeinsames buntes Merkmal. Nahe dem einen Ende der einen Hälfte sehen wir dann rotviolette oder Purpurtöne, nahe dem anderen Ende grüngelbe Töne, und die ersteren haben mit den letzteren nichts gemeinsames in ihren bunten Eigenschaften. In der anderen Hälfte finden wir nahe dem einen Ende derselben blauviolette Töne, nahe dem anderen Ende gelbgrüne, und abermals zeigen die letzteren keine Verwandtschaft oder Ähnlichkeit mit den ersteren. Wir mögen den Zirkel hälften wie wir wollen, immer stoßen wir, wenn die Teilungslinie nicht durch zwei Urfarben geht, auf Farben, welche mit gewissen anderen Farben derselben Hälfte keinerlei buntes Merkmal gemeinsam und daher mit denselben keinerlei Ähnlichkeit des Farbentones haben. Auf diese Weise erkennen wir abermals, dass eine rationelle Einteilung des Farbenzirkels oder Gruppierung der Farbentöne auf Grund ihrer inneren Verwandtschaft nur mit Hilfe der genannten vier Urfarben möglich wird.

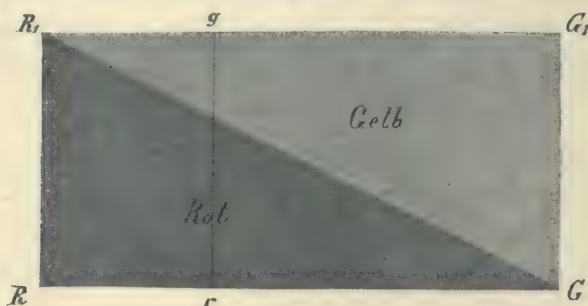
Wenn wir eine Farbe sehen, deren Ton einem der vier Urfarbentöne sehr nahe steht, so können wir zweifelhaft sein, ob ihr Ton dem der bezüglichen Urfarbe genau entspricht oder nicht. Haben wir aber eine ganze Reihe nach ihrer Verwandtschaft geordneter z. B. roter Farbentöne derart vor uns, dass am einen Ende der Reihe ein ganz deutlich bläuliches, am anderen Ende ein ganz deutlich gelbliches Rot liegt und dazwischen alle durch das Urrot hindurch gehenden Übergangstöne, so kommen wir, wenn wir die Reihe langsam z. B. vom bläulich-roten Ende her durchmustern, stets zu einem Rot, welches insofern einen Wendepunkt in der Reihe bildet, als hier jede Bläulichkeit aufhört und weiterhin die Gelblichkeit beginnt. Durchläuft unser Blick die Reihe vom anderen Ende her, so kommt es sehr gewöhnlich vor, dass das, dem Wendepunkte entsprechende Rot, in welchem die Gelblichkeit eben aufhört, dem gelblichroten Ende der Reihe etwas näher liegt, als die bei der ersten Art der Durchmusterung für das Urrot gefundene Stelle. Dies ist eine Folge des successiven Farbenkontrastes; das Auge, welches soeben gelbliches Rot gesehen hat, sieht infolge des Kontrastes dort bläuliches Rot, wo ihm Urrot oder gelbliches Rot erscheinen würde, wenn es zuvor Bläulichrot gesehen hätte. Überhaupt hängt es von der jeweiligen chromatischen Stimmung des Auges, über welche später zu sprechen sein wird, wesentlich mit ab, welche Farbe von einer bestimmten Strahlung hervorgerufen wird, daher es schon deshalb unmöglich wäre, für jede Urfarbe ein ganz bestimmtes Pigment oder eine ganz bestimmte Strahlung als diejenigen zu bezeichnen, durch welche diese Urfarbe unter allen Umständen hervorgerufen werden müsse.

Dazu kommen noch, sofern es sich um zusammengesetzte Strahlungen

handelt, die Verschiedenheiten des Tageslichtes, von welchem das bezügliche Pigment beleuchtet wird, und endlich die individuellen Verschiedenheiten des Farbensinnes. Jede Farbe und also auch eine Urfarbe ist, wie wir schon sahen, nicht an eine bestimmte Strahlung, sondern an eine bestimmte Regung unseres inneren Auges gebunden, und nur, wenn die Stimmung des letzteren wieder genau dieselbe ist, wird auch eine bestimmte Strahlung wieder genau dieselbe Art der Regung und dementsprechend genau dieselbe Farbe erwecken.

Denken wir uns die Reihe der Farbentöne, welche im idealen Farbenzirkel zwischen zwei Urfarben z. B. Urgelb und Urrot liegen, auf einer Geraden (*RG* Fig. 3) angeordnet, an deren beiden Endpunkten die beiden Urfarben liegen, so können wir die verschiedenen Grade der Ähnlichkeit, welche die einzelnen Zwischenfarbentöne mit denen der beiden Urfarben haben, durch das beistehende Schema (Fig. 3) darstellen. Das Viereck RR_1G_1G sei durch die Diagonale R_1G in eine untere rote (RR_1G) und eine obere gelbe (GG_1R_1) Hälfte geteilt. Zu jedem Punkte der Geraden *RG*, z. B. zum Punkte *r*, gehört eine Ordinate (*rg*), welche einesteils im roten, anderenteils im gelben Teile des farbigen Vierecks liegt; das Verhältnis dieser beiden Ordinatenteile ist für jeden Punkt der Geraden ein anderes und drückt das für den bezüglichen Farbenton charakteristische Deutlichkeitsverhältnis der Röte zur Gilbe aus. Wir sehen den gelben Ordinatenteil in dem Maße wachsen und den roten abnehmen, in welchem die Ähnlichkeit der bezüglichen Farbe mit dem Urgelb wächst und die Ähnlichkeit mit dem Urrot abnimmt.

Fig. 3.



Eine derartige schematische Darstellung der Ähnlichkeits- oder Verwandtschaftsverhältnisse der Farbentöne lässt sich auf den ganzen Farbenzirkel anwenden, wie dies die obere Figur auf Taf. I zeigt. Zugleich giebt dieses Schema eine passende Unterlage für die Bezeichnung der Zwischenfarbentöne. Es genügt, dies an einem Quadranten des Farbenzirkels zu erläutern:

Sämtliche zugleich dem Urrot und dem Urgelb verwandten Farbentöne lassen sich als rot-gelbe oder gelb-rote bezeichnen, womit zunächst über das Verhältnis ihrer Röte zur Gilbe nichts ausgesagt sein soll. Sind diese beiden Merkmale in dem Farbentone beiläufig gleich deutlich, so könnte man ihn unter Benutzung des Gleichheitszeichens rot = gelb oder gelb = rot nennen. Überwiegt die Röte offenbar die Gilbe, so bezeichnet der Sprachgebrauch die Farbe als gelbrot und im umgekehrten Falle als rotgelb, was

sich auch durch gelb < rot, bezw. rot < gelb ausdrücken ließe. Hat endlich der überwiegend rötliche Farbenton nur einen deutlichen Stich ins Gelbe, so nennt man ihn gelblichrot (gelb << rot), und ist der Ton ganz überwiegend gelblich und spielt nur ins Rot, so heißt er rötlichgelb (rot << gelb).

Auch könnte man, wie dies einst H. Spencer vorgeschlagen hat, die einzelnen Farbentöne des Farbenzirkels in analoger Weise benennen, wie die Himmelsrichtungen auf der Windrose, indem man an die Stelle der vier Haupt-Himmelsrichtungen die vier Urfarbentöne setzt.

Immer aber handelt es sich bei diesen Farbenbezeichnungen nur um das, was man eben an der Farbe sieht, nicht um das Strahlgemisch oder das Pigment, von denen die bezügliche Farbe veranlasst wurde und an welches man vielleicht dabei denkt.

Man hat bestritten, dass den von mir als Urfarben bezeichneten Farbentönen eine ausgezeichnete Stellung in der Farbenreihe zukomme, und behauptet, dass man mit demselben Rechte jeden anderen Farbenton eine Urfarbe nennen könne; nur zufällige, gar nicht im Wesen der Farben begründete Umstände hätten dahin geführt, vier Farbentöne bezw. Gruppen einander nahestehender Farbentöne mit besonderen Worten (Rot, Gelb, Grün, Blau) zu bezeichnen. Es lässt sich mit dem, der solches behauptet, nur unter der Voraussetzung sprechen, dass derselbe ebenso sieht, wie wir selbst, dass also die Qualitäten seines Gesichtssinnes dieselben sind, wie die des unserigen, und dass Unterschiede und Ähnlichkeiten, die wir zwischen den einzelnen Sinnesphänomenen finden, auch für den anderen vorhanden sind. Es mag sein, dass für einige von denen, die mir nicht zugestimmt haben, das Bunte in den Phänomenen des Gesichtssinnes angeborenermaßen weniger entwickelt ist, wie es ja auch bei gewissen Augenleiden vorkommt, dass das Bunte immer weniger und schließlich gar nicht mehr gesehen wird, sondern nur noch Weiß, Grau und Schwarz. Zum Teil mögen auch lang eingewurzelte Vorstellungen und Meinungen zu einem Hindernis des Verständnisses dessen geworden sein, was ich meine. Aber auf solche Ursachen lassen sich keineswegs alle Einwendungen zurückführen, die man mir gemacht hat. Denn dieselben sind zu einem großen Teile derart, dass sie das Wesentliche meiner Auffassung gar nicht treffen, sondern nur die zufällig gewählte Art der Darstellung. So habe ich gesagt, man könne die Zwischenfarben, z. B. Orange, als zusammengesetzte oder gemischte bezeichnen zum Unterschiede von den Urfarben als einfachen Farben. Dagegen wurde eingewendet, dass es zusammengesetzte Gesichtsempfindungen nicht gebe, und dass Orange eine ebenso einfache Empfindung sei wie Rot oder Gelb. Mir scheint es hier völlig gleichgültig zu sein, ob man von zusammengesetzten Empfindungen sprechen will oder nicht, und ob man die Phänomene des Gesichtssinnes überhaupt Empfindungen nennen will. Es handelt sich lediglich darum, dass diesen Phänomenen gewisse Merkmale oder Eigenschaften zukommen, dass bestimmte Merkmale oder Eigenschaften ganzen Gruppen dieser Phänomene gemeinsam sind, wenn auch den einzelnen Gliedern einer Gruppe in verschiedenem Maße der Deutlichkeit, und dass eben hierauf die mehr oder minder große Ähnlichkeit der einzelnen Glieder einer Gruppe beruht. So charakterisiert eine gewisse Röte und eine gewisse Bläue alle zwischen dem Urrot und dem Urblau liegenden Töne des Farbenzirkels.

Ob ich nun die Röte und Bläue des Violett als Bestandteile oder Komponenten, oder ob ich sie als Merkmale oder Eigenschaften des Violett bezeichne, scheint mir hier gleichgültig. Wesentlich aber scheint mir, dass man Violett und Orange nicht in demselben Sinne als Merkmale des Urrot nehmen kann, wie Gelb und Rot als Merkmale des Orange, oder Blau und Rot als solche des Violett, obwohl das Rot in der Farbenreihe ganz ebenso zwischen Orange und Violett steht, wie Orange zwischen Rot und Gelb oder Violett zwischen Rot und Blau.

Die später zu besprechende Thatsache, dass man durch Mischung eines blauen Farbstoffes mit einem gelben ein grünaussehendes Gemisch erhält, kann den, der eine strenge begriffliche Scheidung zwischen der Farbe als Sinnesqualität und dem als Träger der Farbe erscheinenden Farbstoffe noch nicht vorgenommen hat, vielleicht verführen, einem Grün zugleich Gilbe und Bläue zuzuschreiben, obwohl die Beobachtung lehrt, dass ein ganz gleichartiges grünes Farbenfeld nie in deutlicher Weise zugleich gelblich und bläulich aussieht. Man kann wohl zweifelhaft sein, ob man ein gegebenes Grün für Urgrün nehmen dürfe oder ob es nicht doch vielleicht spurweise gelblich oder bläulich sei. Niemand aber wird behaupten wollen, dass ein Grün in deutlicher Weise zugleich gelblich und bläulich sein könne, wie ein Violett zugleich bläulich und rötlich erscheint, und niemand wird versuchen, ein Grün als Blaugelb oder Gelbblau in demselben Sinne zu bezeichnen, wie man ein Violett unbedenklich als Rotblau oder Blaurot bezeichnet.

Aber möge man der hier vertretenen Auffassung zustimmen oder nicht, so ist doch unbestreitbar, dass sie uns das Mittel giebt, die verschiedenen Farbentöne verständlich zu benennen. Dies wird eben nur dadurch möglich, dass in den bunten Farben vier variable Eigenschaften angenommen werden, nämlich die Röte, Gilbe, Grüne und Bläue, und so die entsprechenden vier Farbentöne zur Grundlage der Nomenklatur gemacht werden. Sobald man nur drei Variable, z. B. Rot, Grün und Violett, gelten lässt und auf diese eine Nomenklatur zu gründen versucht, überzeugt man sich sofort von der Unbrauchbarkeit des Verfahrens. Man muss dann z. B. Gelb als ein Rotgrün oder Grünrot, Blau als ein Violettgrün oder Grünviolett bezeichnen. Dass man dadurch dem Uneingeweihten ganz unverständlich würde, wäre zwar störend, aber in theoretischer Hinsicht gleichgültig. Nicht gleichgültig aber wäre, dass bei solcher Bezeichnungsweise die Namen der Farben gar nicht zum Ausdruck bringen, in welcher Art und in welchem Grade die letzteren unter sich verwandt erscheinen.

Übrigens wird später dargelegt werden, dass den vier Variabeln des Farbentones, welche ich angenommen habe, auch vier physiologische Variable entsprechen, womit dann die Einwände gegen meine Auffassung auch denen gegenüber ihre Erledigung finden werden, welche die Farben nicht nach ihrer Beschaffenheit, sondern auf Grund korrelativer physiologischer Prozesse ordnen wollten.

Schon Aubert (6, S. 186) sagte im Jahre 1865: »Wollen wir uns über die Farbenempfindungen verständigen, so genügen als Hauptbezeichnungen die Worte Schwarz, Weiß, Rot, Gelb, Grün und Blau, die ich daher als Prinzipalempfindungen oder Prinzipalfarben bezeichnen möchte.« »Die Zusammensetzungen und sonstigen Modifikationen jener Worte genügen, um alle unsere Farbenempfindungen auszudrücken oder wenigstens auf die Prinzipalempfindungen in verständlicher Weise zu beziehen.« Auch E. Mach (13, S. 321), auf dessen Untersuchungen zurückzukommen sein wird, nahm Rot, Gelb, Grün, Blau als »Grundfarbenempfindungen« an, »da man nur in diesen bei der bloßen Betrachtung keine anderen Farben erkennt« [1].

Helmholtz stand einer lediglich auf die Eigenschaften der Farben selbst gegründeten Analyse derselben durchaus ablehnend gegenüber. »Welch trügerisches Mittel,« wandte er mir ein (2, S. 380), »die angebliche innere Anschauung in solchen Dingen ist, zeigt am besten das Beispiel von zwei solchen Autoritäten, wie Goethe und Sir D. Brewster, die beide glaubten, im Grün das Blau und Gelb zu sehen, aus denen sie es, getäuscht durch die Erfahrungen an Malerfarben, gemischt glaubten.« Was sich Helmholtz hier unter »innerer Anschauung« gedacht hat, ist mir nicht verständlich. Wenn ich offenen Auges zwei vor mir erscheinende Farben vergleiche, so geschieht dies mittels einer »äußeren Anschauung« und auf Grund solcher Vergleichungen beruht eben die Analyse der Farben als Sehqualitäten. Der Irrtum Goethe's und Brewster's

1) v. Kries hat neuerdings irrtümlicherweise von einer »Vierfarbentheorie« Aubert's gesprochen (Handb. d. Physiol. von Nagel, III. Bd., S. 146). Aber dieser um die Lehre vom Licht- und Farbensinn so verdiente Forscher hat nie irgendwelche Farbentheorie entwickelt; er hat lediglich einen »Einteilungsgrund« für die Mannigfaltigkeit der Farben gesucht, »um sich verständigen zu können«, und dementsprechend »besonders hervorragende oder sich oft wiederholende Empfindungen zur Basis genommen«, wie man dies »seit den ältesten Zeiten« gethan habe. Erst später habe man »die Ursachen als Einteilungsgrund benutzt oder die Verschiedenheit der zuleitenden Organe oder Nerven«. Bei der Erklärung der Thatsachen, insbesondere der Nachbilder und des Kontrastes, hat sich Aubert »im ganzen der Brücke-Helmholtz'schen Auffassung angeschlossen« (6, S. 389). Die Young'sche Dreifarbentheorie hat er eingehend und durchaus nicht ablehnend diskutiert; von einer eigenen Theorie ist aber in Aubert's Schriften nichts zu finden. Der Ausdruck »Vierfarbentheorie« ist zuerst von mir gebraucht worden, als Donders einer von mir entwickelten Theorie eine andere, ebenfalls auf der Annahme von vier bunten Urfarben (Rot, Gelb, Grün, Blau) beruhende entgegengestellt hatte. Dürfte man die von Aubert benutzte Nomenklatur als eine Vierfarbentheorie bezeichnen, so wäre auch nicht Aubert, sondern die Sprache als Autor derselben zu nennen, denn dieselbe hat Rot, Gelb, Grün und Blau längst als die Hauptfarben aus der Mannigfaltigkeit der bunten Farben herausgehoben. Später hat Aubert der von mir entwickelten Theorie, welche ich insbesondere als die Theorie der Gegenfarben bezeichnet habe, in allen irgend wesentlichen Punkten ausdrücklich zugestimmt und dieselbe seiner Darstellung der Lehre vom Licht- und Farbensinn in der ersten Auflage dieses Handbuches zu Grunde gelegt. Eine Rechtfertigung seines früheren Standpunktes lag für ihn in der Meinung, dass die Theorie der Gegenfarben und die Young-Helmholtz'sche Dreifarbentheorie »sehr wohl mit einigen Modifikationen nebeneinander bestehen könnten, wenn man den Erregungsvorgang streng unterscheide vom Empfindungsvorgang«, und für ersteren die Dreifarbentheorie, für letzteren die von mir entwickelte gelten ließe. Nachher ist auch Donders für eine solche Fusion der Young'schen Theorie und seiner eigenen Vierfarbentheorie eingetreten.

lässt sich ebenso gut als ein weiterer Beweis dafür anführen, dass man den Mitteln und Methoden, durch welche man sich eine Farbe zur Anschauung gebracht hat, keinen Einfluss auf die Beurteilung der Farben als solcher gestatten darf. Eine beherzigenswerte Mahnung giebt uns der Irrtum Goethe's allerdings. Er zeigt, einen wie großen Einfluss hier vorgefasste Meinungen und durch dieselben geweckte Associationen auf unser Urteil nehmen können; und wenn es mir nicht gelungen wäre, auch noch auf einem ganz anderen als dem oben eingeschlagenen Wege, zu zeigen, dass Weiß, Schwarz, Gelb, Blau, Rot und Grün die Variabeln des Lichtsinnes sind, so würde ich als Physiologe seinerzeit Bedenken getragen haben, dies mit solcher Bestimmtheit anzunehmen, wie ich es gethan habe.

§ 13. Die Gegenfarben. Der Farbenzirkel zeigt uns, wie jede der vier bunten Urfarben durch eine Reihe stetig ineinander übergehender Zwischentöne verbunden ist, daher wir eine rot-gelbe, gelb-grüne, grün-blaue und blau-rote Reihe von bunten Zwischenfarben oder -tönen unterscheiden. Dagegen giebt es keine Reihe von rot-grünen oder gelb-blauen Zwischentönen, und also keine Farbe, deren Ton gleichzeitig dem Urrot und Urgrün, oder gleichzeitig dem Urgelb und Urblau ähnlich oder verwandt erscheint. Keine Farbe ist deutlicherweise rötlich und grünlich, keine gelblich und bläulich zugleich, Röte und Grüne schließen sich ebenso aus wie Gilbe und Bläue. Von einer Farbe, welche etwas Rotes an sich hat, können wir zu einer Farbe, die mehr oder weniger grünlich ist, durch eine stetige, bunte Farbenfolge nur auf dem Umwege über das Urgelb oder das Urblau gelangen, und von einer irgendwie gelblichen zu einer bläulichen Farbe führt eine stetige Reihe von Farbentönen nur über das Urrot oder über das Urgrün.

Die erwähnten vier Reihen von Zwischentönen verhalten sich ähnlich wie die schwarz-weiße Farbenreihe, auf welcher wir ebenfalls vom Schwarz zum Weiß durch eine stetige Reihe von Zwischenfarben gelangen können, deren jede einerseits dem Schwarz, andererseits dem Weiß mehr oder weniger verwandt erscheint. Zwischen Rot und Grün aber, oder zwischen Gelb und Blau giebt es keine analoge Farbenreihe. Ein freies Rot lässt sich durch stetig zunehmende Verhüllung mit einer tonfreien Farbe, z. B. mit einem Grau, in dieses überführen, und dieses Grau wieder durch stetige Abnahme der Verhüllung in freies Grün, und Analoges gilt von Gelb und Blau; aber es handelt sich hierbei abermals nicht um eine Farbenreihe, in welcher jedes Glied etwas von der bunten Qualität der beiden Endglieder Rot und Grün bezw. Gelb und Blau an sich hat. Denn von der freien roten Farbe ausgehend sehen wir die Röte der Farbe immer mehr schwinden, ohne dass sich gleichzeitig eine entsprechend wachsende Grünlichkeit zeigt, vielmehr muss erst die Röte im Grau gänzlich verschwunden sein, ehe jenseits dieses Grau die Grünlichkeit beginnen kann.

Da also Röte und Grüne, bezw. Gilbe und Bläue in keiner Farbe gleichzeitig deutlich sind, sich vielmehr gegenseitig auszuschließen scheinen, habe

ich dieselben als Gegenfarben bezeichnet. Hiermit soll zunächst lediglich die Art ihres Vorkommens gekennzeichnet sein ohne jede Beziehung auf irgendwelche Erklärung.

Es werden später einige besondere Umstände zu besprechen sein, unter welchen man meinen kann, eine Farbe zu sehen, welche gleichzeitig rötlich und grünlich oder gelblich und bläulich ist; vorerst möge es bei der soeben aufgestellten Regel sein Bewenden haben.

Zwei Zwischenfarbentöne, welche zwei einander gegenüber liegenden Quadranten des Farbenzirkels angehören, z. B. dem rot-gelben und dem grün-blauen, sind in doppelter Beziehung gegenfarbig; gehören sie jedoch zwei nebeneinander liegenden Quadranten an, wie z. B. dem rot-gelben und dem grün-gelben, so sind sie nur in einer Beziehung gegenfarbig.

Es erscheint von vornherein höchst auffällig, dass es z. B. zwischen Rot und Grün nicht ebenso eine Reihe bunter Zwischenfarben giebt, wie zwischen Rot und Gelb oder zwischen Rot und Blau, dass es also keine Farben giebt, welche uns in ähnlicher Weise zugleich rötlich und grünlich erscheinen, wie das Orange zugleich rötlich und gelblich oder das Grau zugleich weißlich und schwärzlich. Wir dürfen daraus schließen, dass im inneren Auge ein physiologischer Prozess, dessen psychisches Korrelat von gleichzeitig deutlicher Röte und Grüne bezw. Gilbe und Bläue wäre, entweder überhaupt nicht oder nur unter ganz besonderen, ungewöhnlichen Bedingungen möglich ist.

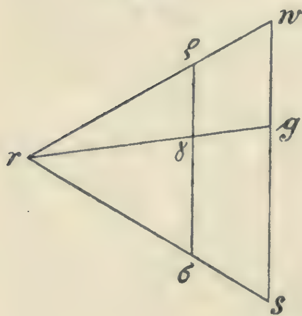
§ 14. Die verhüllten bunten Farben. Wenn eine bunte Farbe in deutlicher Weise weißlich, graulich oder schwärzlich erscheint, nenne ich sie, wie schon gesagt, eine verhüllte Farbe. So oft zwei Farben zwar denselben Farbenton zeigen, doch aber verschieden erscheinen, beruht dies darauf, dass ihre Verhüllung entweder nur verschiedenen Grades oder verschiedener Art oder beides zugleich ist. Da die Verhüllung der bunten Farbe mit jeder beliebigen, der schwarz-weißen Farbenreihe angehörigen Farbe und in allen denkbaren Graden bis zum fast völligen Verschwinden des Farbentones möglich ist, so entspricht jedem einzelnen Farbentone eine Mannigfaltigkeit verhüllter Farben, welche viel größer und höherer Ordnung ist, als die Mannigfaltigkeit der Farbentöne selbst.

Man kann sagen, es lasse sich an jeder deutlich verhüllten bunten Farbe ein bunter und ein schwarz-weißer Bestandteil unterscheiden, und das Deutlichkeitsverhältnis dieser beiden Bestandteile oder Merkmale entspreche dem Verhüllungsgrade der bunten Farbe. Je ähnlicher letztere dem Weiß, Schwarz oder einem beliebigen Grau ist, desto größer ist, so lässt sich bildlich sagen, ihr schwarz-weißer, desto kleiner ihr bunter Bestandteil. Es handelt sich also auch hier wieder nur um einen Ausdruck für das Ausmaß der Ähnlichkeit, welchen z. B. ein gegebenes Grau-Rot einerseits

mit dem freien Rot gleichen Tones, andererseits mit dem bezüglichen Grau hat.

Denkt man sich an die eine Ecke r (Fig. 4) eines Dreieckes ein ganz freies Rot von bestimmtem Tone, an die zweite Ecke w ein ganz reines Weiß und an die dritte s ein ganz reines Schwarz gestellt, so kann man sich auf der von r zu w führenden Linie alle möglichen Stufen des Überganges von jenem freien Rot zum reinen Weiß, und auf der die Ecken r und s verbindenden Linie alle Übergänge zwischen dem freien Rot und dem reinen Schwarz angeordnet denken. Mit wachsender Entfernung vom freien Rot würden also die so angeordneten Farben einerseits immer mehr durch Weiß, andererseits durch Schwarz verhüllt erscheinen, bis schließlich im reinen Weiß oder Schwarz die letzte Spur von Röte verschwände. Zugleich ließe sich bei entsprechender Anordnung der Farben der Ort (z. B. ϱ) eines bestimmten weißverhüllten Rot durch das Verhältnis ($r\varrho : \varrho w$) seiner Abstände einerseits vom freien Rot und andererseits vom reinen Weiß charakterisieren.

Fig. 4.



Auf der dritten Seite (sw) des Dreieckes kann man sich ferner die ganze Reihe der schwarz-weißen Farben so angeordnet denken, wie dies in § 10 erörtert wurde. Dann entspricht jedem Punkte dieser Seite ein bestimmtes Weiß, Grau oder Schwarz, und auf jeder Geraden (z. B. rg), welche ein bestimmtes Schwarz-Weiß mit dem Orte des freien Rot verbindet, lassen sich alle Übergänge zwischen dem letzteren und dem ersteren, also alle Grade der Verhüllung mit eben diesem Schwarz-Weiß (g) in stetiger Folge untergebracht denken. Würden dann auch auf dieser Geraden die verhüllten Farben so geordnet sein, dass der Ort jeder einzelnen durch das Verhältnis ($r\gamma : \gamma g$) seiner Abstände von dem Orte des freien Rot und dem Orte des bestimmten Schwarz-Weiß (g) den Verhüllungsgrad der Farbe ausdrückt, so würden auf jeder zur Seite ws parallelen Geraden, z. B. auf $\varrho\sigma$ Farben von gleich starker Verhüllung zu liegen kommen, in denen allen das Verhältnis der bunten Komponente der Farbe zur schwarz-weißen dasselbe wäre.

Ein solches Verhüllungsdreieck, wie ich es nenne, würde die ganze Mannigfaltigkeit der, einem bestimmten Farbentone entsprechenden verhüllten Farben in erschöpfender Weise darbieten. Freilich ließe sich, selbst unter der Voraussetzung einer ganz bestimmten Beleuchtung und Augenstimmung, nur ein sehr beschränkter Teil des Dreieckes durch Pigmente darstellen, u. a. schon deshalb, weil weder ein ganz freies Rot noch ein ganz reines Weiß oder Schwarz zur Anschauung gebracht werden könnte. Aber es ist wichtig, sich wenigstens teilweise die hier summarisch erörterte

Verhüllungsreihe irgendwie zu veranschaulichen, und ich darf hier um so mehr etwas ausführlich sein, als gerade in betreff der verhüllten Farben die in physikalischer Hinsicht so ausgezeichnete Darstellung von Helmholtz so manches schuldig bleibt, was aus dem Gesichtspunkte einer reinlichen Scheidung der Farben als Sehqualitäten von den optischen Strahlungen und deren Intensitäten und »Qualitäten« verlangt werden darf.

Die Verhüllung einer bunten Farbe mit Weiß oder Grau oder Schwarz nannte Aubert (6, S. 108) Nuancierung, und auch ich habe seinerzeit dieses Wort in diesem Sinne gebraucht. Leider hat Aubert, verführt durch Grassmann's Darstellung, außer den »Farbennuancen« auch noch »Farbenintensitäten« unterschieden, was sich gar nicht folgerichtig durchführen lässt, insbesondere nicht betreffs der »Nuancierung« mit Schwarz.

Um einer, durch die hier von mir gewählte Bezeichnungsweise begünstigten einseitigen Auffassung der verhüllten Farben zu begegnen, ist es zweckmäßig zu bedenken, dass der Begriff der Verhüllung sich nicht nur auf das bunte Merkmal (die bunte Komponente) der Farbe, sondern auch auf ihr schwarz-weißes Merkmal (die schwarz-weiße Komponente) anwenden lässt. Denken wir uns z. B. eine deutlich ins Graue spielende rote Farbe. Eine solche lässt sich auch auffassen als ein bestimmtes Grau, welches mehr oder weniger mit Rot verhüllt ist; sie lässt sich ferner auffassen als ein mit einem bestimmten Schwarz-Rot verhülltes Weiß oder umgekehrt als ein mit Weiß verhülltes Schwarz-Rot. Endlich lässt sie sich auffassen als mit einem bestimmten Weiß-Rot verhülltes Schwarz oder als mit Schwarz verhülltes Weiß-Rot. Macht man sich dies in jeder Hinsicht klar und übt man sich darin, eine solche wechselnde Auffassung auf die einzelnen verhüllten Farben, die man vor sich hat, bezw. auf die verschiedenen Verhüllungsreihen derselben anzuwenden, benutzt man ferner zur Verhüllung einer und derselben bunten Farbe ganz verschiedene Methoden, welche bald diese bald jene Komponente der Farbe vorwiegend zu variieren gestatten, so wird man schließlich lernen, bei der Betrachtung der Farben von der Art ihrer Herstellung ganz abzusehen, sich lediglich an die gegebenen Farben selbst zu halten und nicht immer wieder die jeweilige Beschaffenheit der eben vorliegenden Strahlungen zur Charakterisierung der Farben mit herbeizuziehen.

So wenig sich der Freiheitsgrad einer bunten Farbe genauer bestimmen lässt, so wenig lässt sich von einer uns als besonders frei erscheinenden Farbe behaupten, dass ihre Freiheit eine absolute sei. Nur wenn wir zwei Farben gleichen Tones, aber zureichend verschiedener Freiheit vor uns haben, können wir mit Sicherheit angeben, welche die freiere ist. Die durch annähernd oder vollkommen homogene Strahlungen veranlassten Farben sind bei passend gewählter Energie der Strahlung besonders frei, womit nicht gesagt sein soll, dass die mittels gewisser farbiger Gläser oder Flüssigkeiten

hergestellten Farbenfelder nicht unter günstigen Umständen denselben Grad von Freiheit erreichen könnten. Erleuchtet man aber z. B. das Gesichtsfeld eines Fernrohres in später zu besprechender Weise mit einem homogenen Lichte und steigert oder mindert dann für die eine Hälfte des zunächst in schöner freier Farbe erscheinenden Feldes die Intensität der Strahlung, so zeigt sich die Farbe der einen Hälfte freier als die der anderen, und zwar je nach den Umständen bald die stärker bald die schwächer beleuchtete. Hat man zunächst nur die eine Hälfte des Feldes homogen erleuchtet und macht dann in der anderen Hälfte die Gegenfarbe sichtbar, so steigert sich sofort die Freiheit der Farbe der ersten Hälfte in auffallender Weise.

Die Verhüllung einer einzeln gesehenen bunten Farbe muss schon eine relativ beträchtliche sein, wenn sie uns sofort als solche zum Bewusstsein kommen soll. Übung fällt hier sehr ins Gewicht; aber auch der Geübteste vermag wohl von zwei nebeneinander erscheinenden Farben gleichen Tones und gleicher Art der Verhüllung leicht anzugeben, welche von beiden die freiere sei, aber bei Farben verschiedenen Tones oder verschiedener Art der verhüllenden schwarz-weißen Farbe ist ihm dies oft unmöglich. Erscheinen zwei bunte Farben äußerst wenig verschieden, so vermag er zuweilen nicht zu sagen, ob die merkliche Verschiedenheit auf verschieden großer Freiheit oder auf verschiedener Art der verhüllenden schwarz-weißen Farbe beruht, worauf schon Aubert hingewiesen hat.

Wenn ich also von freien Farben spreche, so gilt der Begriff der Freiheit nur relativ. Nach meiner Ansicht ist jede uns wirklich vorkommende Farbe mehr oder weniger verhüllt, aber erst wenn die Verhüllung eine ganz deutliche ist, nenne ich die Farbe eine verhüllte.

Verhüllung bunter Farben mit Schwarz. Hier ist zuerst an das zu erinnern, was in § 9 über die Entstehungsbedingungen des Schwarz gesagt worden ist. Wie ein tieferes Schwarz überhaupt nur dann im Sehfelde erscheint, wenn gleichzeitig an anderen Stellen des letzteren helle Farben gesehen werden, so gilt dies auch von den ins Schwarz gehenden bunten Farben. Blickt man durch eine dicht an's Auge gesetzte innen samtschwarze Röhre mit enger unterer Öffnung auf eine schön buntfarbige z. B. blaue Fläche und schwächt dann die Beleuchtung der letzteren allmählich ab, so wird doch die Öffnung nie schwarzblau erscheinen, mag man die Lichtstärke der Fläche auch noch soweit herabsetzen. Der Versuch lässt sich am bequemsten in einem Zimmer anstellen, welches nur durch ein großes stellbares Diaphragma Licht empfängt. Man thut zur Vermeidung von Nachbildern gut, nicht während der ganzen Dauer der allmählichen Verfinsterung der Fläche durch die Röhre zu blicken, sondern nur mit längeren Zwischenpausen die einzelnen Stufen der Änderung zu beobachten, welche die blaue Farbe dabei zeigt. Je strahlschwächer die Fläche geworden

ist, desto mehr verliert ihre Farbe an Freiheit, und wenn die Bläue schon fast oder ganz geschwunden ist, erscheint die weißlich oder graulich gewordene Öffnung doch noch deutlich heller als das übrige Sehfeld, bis sie schließlich mit dem Dunkel des letzteren verschwimmt, ohne jemals schwarzblau oder blauschwarz geworden zu sein. Alle anderen buntfarbigen Felder verhalten sich ähnlich, und nur darin sind sie verschieden, dass das Bunte bei dem einen früher, bei dem anderen später bis zur Unkenntlichkeit verbleicht. Gewisse bunte Farben sind bis kurz vor dem völligen Verschwinden des Feldes noch an ihrem Ton erkennbar, andere werden schon verhältnismäßig bald tonfrei. Hierauf wird später ausführlich zurückzukommen sein. Übrigens vermag keine Beschreibung die eigene Beobachtung dieser Erscheinungen zu ersetzen.

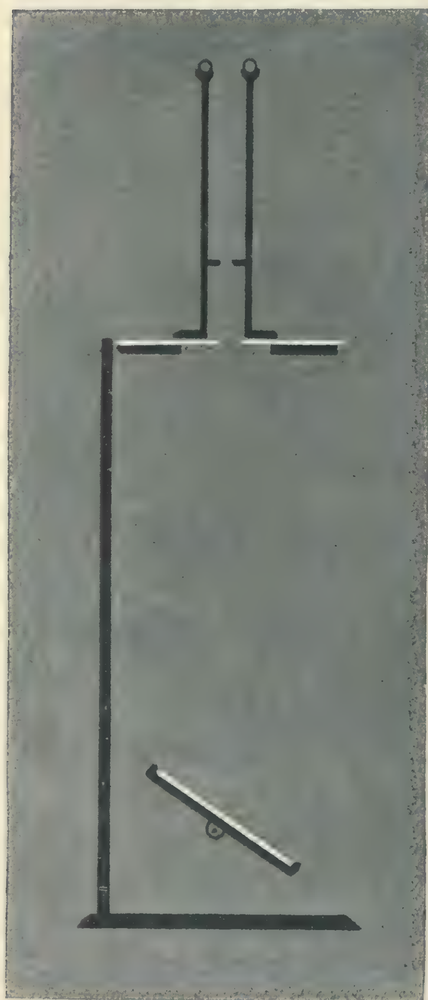
So kann man sich leicht überzeugen, dass man keine, wenn auch anfangs möglichst freie bunte Farbe durch bloße Abschwächung der sie erzeugenden Strahlung nach dem Schwarz hin abzuwandeln vermag, so lange gleichzeitig das übrige Gesichtsfeld verfinstert ist. Dies gilt auch von solchen Farbenfeldern, welche durch eine homogene Strahlung erzeugt wurden. In § 5 wurde kurz erörtert, wie man sich jede einzelne Farbe des Spektrums gesondert zur Anschauung bringen kann. Durch Verengung des Spaltes, welcher die bezügliche Strahlung liefert, kann man die Stärke der letzteren bis zum Verschwinden herabsetzen und sich überzeugen, dass man auch auf diese Weise bei Abschluss jeden anderweiten Lichtes nie ein Schwarzblau, Schwarzgrün, Schwarzrot, Braun (s. u.) zu sehen vermag, welche Farben uns im beleuchteten Raume doch oft genug begegnen.

Sollen also schwarzverhüllte Farben im Sehfelde erscheinen, so darf dasselbe nicht im übrigen dunkel sein. Dementsprechend gelingt die Abwandlung jeder bunten Farbe nach dem Schwarz hin schon in folgender einfacher Weise. Man schlägt in ein steifes weißes Papier ein Loch von einigen Centimetern im Durchmesser und hält es in der Nähe des Fensters derart gegen das einfallende Licht, dass es besonders günstig beleuchtet ist. Durch das Loch blickt man von oben auf die darunter befindliche, zunächst ebenso gegen das Fenster orientierte möglichst freifarbige Fläche, welche um eine horizontale, parallel zur Fensterebene liegende Achse gedreht werden kann, was man im Notfall aus freier Hand thut. In dem Maße, als dabei die Fläche vom Fenster ab- und dem Zimmer zugewendet wird, nimmt die Stärke der von ihr zurückgeworfenen Strahlung ab, wobei man das Loch immer schwärzlicher werden sieht. Warum bei derartigen Versuchen die benutzte Pigmentfläche ganz matt und durchaus eben, und das Auge für die Entfernung des Loches und nicht der Pigmentfläche akkommodiert sein soll, wurde in § 5 erörtert. Um die Verdunklung derselben möglichst weit treiben zu können, bleibt man etwas ferner vom

Fenster und hält das von den Seiten kommende Licht durch kleine schwarze Schirme von der Pigmentfläche ab.

Sehr bequem ist für derartige Versuche die in Fig. 5 im Vertikaldurchschnitt skizzierte Vorrichtung, d. i. ein Kasten, welcher nach dem Fenster hin offen ist, so dass das Himmelslicht auf eine in ihm befindliche, um eine horizontale Achse drehbare Glastafel fallen kann, welche mit dem farbigen z. B. orangefarbenen Papier überzogen ist. Auf der oberen Wand des Kastens liegt ein steifes, undurchsichtiges, oben mit mattem weißen Papier überzogenes Blatt mit einem runden Loch, auf welches, wenn nötig, eine Dunkelröhre aufgesetzt werden kann, wie dies Fig. 5 zeigt. Ist die Röhre entfernt und liegt die Glasplatte so, wie in der Figur, so sieht man von oben her ein kreisrundes orangefarbenes Feld in der Ebene des weißen Papieres. Dreht man jetzt die Glasplatte zurück, so verhüllt sich das Orange zunehmend mit Schwarz, wird zunächst hellbraun, dann dunkelbraun und schließlich bräunlichschwarz. Setzt man dann, ohne im übrigen irgend etwas zu ändern, die Dunkelröhre auf, so sieht man durch dieselbe sofort wieder ein leuchtendes Orange, welches sich ebenso schnell abermals in Braunschwarz verwandelt, wenn die Dunkelröhre wieder entfernt wird: ein selbst den Kenner immer von neuem überraschendes Schauspiel.

Fig. 5.



Sehr leicht lassen sich bunte Farben mit Hilfe des Farbenkreisels beliebig mit Schwarz verhüllen, wenn man den Kreisel in einem gut beleuchteten Zimmer vor einem weißen Hintergrunde aufstellt und einen immer größeren Teil einer auf den Kreisel gebrachten bunten Scheibe mit Sektoren eines tiefschwarzen Papieres verdeckt. Die so erzielten Übergangsfarben zwischen bunter Farbe und Schwarz sind um so schöner, je freier bei ruhender Scheibe die bunte Farbe des einen und je dunkler die schwarze Farbe des anderen Scheibensektors erscheint. Die Fülle überraschend schöner dunkler Farben, die man sich auf diese Weise zur Anschauung bringen kann, ist unerschöpflich.

Auch die durch spektrale homogene Strahlungen erzeugten Farbenfelder lassen sich schwärzen, wenn ihre unmittelbare Umgebung gut beleuchtet ist

und z. B. weiß erscheint. Man erreicht das u. a. leicht mit Hilfe eines zu diesem Zwecke eingerichteten Lummer'schen Würfels. Ein kleines buntes Feld erscheint dabei umgeben von einem breiten weißen Ringe; schwächt man die homogene Strahlung, welche das kleine Feld erleuchtet, mehr und mehr ab, während das Weiß des umgebenden Ringes unverändert bleibt, so wird ein Blau des kleinen Feldes schwarzblau, ein Grün schwarzgrün u. s. w. Man erhält auf diese Weise schwarzverhüllte Spektralfarben, die man, wie oben erörtert wurde, trotz aller Abschwächung der bezüglichen Strahlung nie erzielen kann, solange die ganze Umgebung des bunten Feldes verfinstert ist.

Auch ohne jede Änderung der Strahlung lässt sich ein buntes Feld, lediglich durch Beleuchtung seiner Umgebung, mit Schwarz verhüllen. Man kann diese Verhüllung in jedem beliebigen Grade herbeiführen, wenn man z. B. zwei durch eine Thüre verbundene Zimmer zur Verfügung hat, deren eines, das Beobachtungszimmer, weiße Wände hat und sich beliebig verfinstern lässt. Macht man in die ebenfalls weißgestrichene oder mit weißem Papier beklebte Thüre ein Loch, hinter welchem sich ein farbiges Glas befindet, und beleuchtet das Loch mittels eines im anderen Zimmer stehenden weißen Schirmes nur soweit, dass es eben anfängt in einer schön freien Farbe zu erscheinen, so kann man durch stufenweise wachsende Erleuchtung des Beobachtungszimmers diese Farbe entsprechend stufenweise schwärzen und schließlich bei voller Beleuchtung des Zimmers in fast reines Schwarz verwandeln, und zwar dies alles so schnell, dass eine irgend erhebliche Successivanpassung des Auges an die jeweilige Gesamtbeleuchtung sich nicht entwickeln kann. Im folgenden soll diese Versuchsmethode als die Zweizimmermethode bezeichnet werden.

Erleuchtet man die eine Hälfte des Gesichtsfeldes eines kleinen Fernrohres mit einem homogenen Lichte in passender mäßiger Stärke, und sieht man das Halbfeld z. B. als ein freies Orange, so verwandelt sich dasselbe sofort in Braun d. i. ein mit Schwarz verhülltes Orange, wenn man auf der anderen Hälfte ein helles Weiß erscheinen lässt.

Jede deutlich gelbhaltige Farbe, sei sie durch eine homogene oder zusammengesetzte Strahlung bewirkt, lässt sich durch Schwärzung in ein Braun verwandeln. Je näher dabei die schwarz-weiße Komponente der Farbe dem absoluten Schwarz liegt, desto schöner ist das Braun. Ein orangefarbenes Feld wird durch entsprechende Verhüllung mit Schwarz kastanienbraun, noch rötlichere Farbentöne (Feuerrot) geben Rotbraun, grünlichgelbe Farbentöne Olivenbraun, d. i. ein grünliches Braun.

In schlagender Weise zeigen die letzterwähnten Versuche, wie unzureichend es ist, die schwarzverhüllten Farben, wie z. B. das Braun, als »lichtschwache Farben« zu bezeichnen. Unter solchen Farben verstand Helmholtz die durch Strahlungen von geringer Energie erzeugten. Ein in

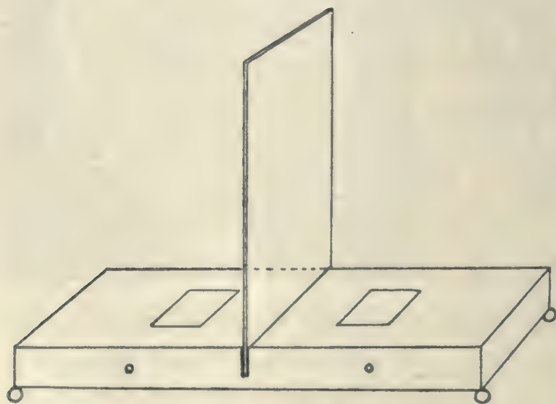
oben beschriebener Weise durch die Dunkelröhre gesehenes gelbes Pigmentfeld kann durch bloße Abschwächung der Beleuchtung nie in Braun verwandelt werden; es wird dabei vielmehr immer weißlicher, verliert weiterhin seine Gilbe vollständig und unterscheidet sich dann von seiner Umgebung nur noch durch seine etwas größere Weißlichkeit. Das für das Braun charakteristische Merkmal, nämlich die Schwärze, kommt auf diese Weise nie neben dem gelben Merkmal (dem Farbenton) deutlich zum Vorschein. Hierauf wird an anderer Stelle zurückzukommen sein.

Gewöhnlich werden nur solche bunte Farben als schwärzlich bezeichnet, welche schon sehr stark mit Schwarz verhüllt sind, deren Ähnlichkeit mit dem reinen Schwarz daher sofort auffällt; die weniger mit Schwarz oder Schwarzgrau verhüllten pflegt man dunkelfarbig zu nennen. Dass die Sprache für die braunen Farben ein uraltes Wort besitzt, steht im Einklang mit der großen Häufigkeit der braunen Farben in der Natur.

Es sei hier wieder daran erinnert, dass man bei den im obigen und im folgenden beschriebenen Versuchen soweit möglich alle diejenigen Vorsichtsmaßregeln treffen soll, welche in § 5 erwähnt und insbesondere als Mittel zur Ausschließung der Gedächtnisfarben bezeichnet worden sind. Obgleich diese Versuche den mitgeteilten Erfolg auch dann haben, wenn man jene Maßregeln vernachlässigt, so ist derselbe doch bei Einhaltung derselben zuweilen noch schlagender und überdies besser vor allerlei Einwendungen geschützt, welchen eine von der gewohnten abweichenden Auffassung ausgesetzt zu sein pflegt.

Verhüllung bunter Farben mit Weiß. Zur Herstellung verschiedener Stufen der Farbenreihe, welche von einer freien bunten Farbe zu einem tonfreien Weiß führt, eignet sich insbesondere die Methode der Zuspiegelung. Die horizontale Oberfläche des in Fig. 6 skizzierten Apparates sei mit schwarzem Samt überzogen. Auf die eine Seite der vertikalen, auf der Mittellinie dieser Fläche stehenden unbelegten Spiegelglasplatte legt man in die Nähe derselben das mit buntem Papier überkleidete 2 cm breite und 4 cm lange Täfelchen, dessen Farbe mit Weiß verhüllt werden soll, und zwar mit der Langseite parallel zur Glasplatte in 1 cm Abstand von derselben; auf die andere Seite ein mit grauem Papier überkleidetes Täfelchen von ganz gleicher Form und zwar so, dass sein Spiegelbild sich für den auf derselben Seite befindlichen Beobachter mit dem direkt gesehenen bunten Täfelchen möglichst genau deckt. Die Farbe des letzteren erscheint jetzt

Fig. 6.



weißlicher, und um sie mit der zuvor gesehenen vergleichen zu können, legt man ein zweites ganz gleiches buntes Täfelchen rechts oder links neben das erste. Dies ist besser, als wenn man das gespiegelte graue Täfelchen so legt, dass sein Spiegelbild das bunte nur teilweise deckt. Schon aus größerer Entfernung sieht man die Farbe des einen bunten Täfelchens etwas weißlich, und je mehr man sich dem Apparat nähert und je kleiner also der Winkel zwischen der Blicklinie und der Glasplatte wird, desto mehr verhüllt sich die Farbe mit Weiß, und noch stärker wird diese Verhüllung, wenn man das graue Täfelchen mit einem weißen vertauscht.

Andere Methoden zur Erzielung weißverhüllter Farben werden später gelegentlich zur Sprache kommen. Dahin gehört das Weißlichwerden gewisser bunter Farben bei starken Steigerungen der Energie der korrelativen Strahlung, ferner das Weißlichwerden einer Spektralfarbe, wenn der bezüglichen Strahlung eine gegenfarbig auf die Netzhaut wirkende zugemischt wird, die Entstehung weißverhüllter Farben infolge gewisser Daueranpassungen u. s. w. Hier kam es nur darauf an, den Leser auf eine möglichst einfache Methode aufmerksam zu machen, die ihm ermöglicht, sich eine Fülle weißverhüllter Farben verschiedenen Tones mühelos zur Anschauung zu bringen.

Die merklich weißverhüllten Farben werden häufig als helle, z. B. als hellblau, hellgrün bezeichnet. Bläulichrote stark mit Weiß verhüllte Farben werden rosa genannt.

Verhüllung bunter Farben mit Grau. Zur Veranschaulichung bunter, mit einem beliebigen Grau verhüllter Farben eignet sich der Farbenkreisel (vgl. § 16). Die geschlitzte Scheibe eines bunten Papieres von möglichst freier Farbe wird mit einer schwarzen und einer weißen Scheibe kombiniert. Da den freiliegenden Sektoren dieser drei ineinandergesteckten Scheiben jedes beliebige Verhältnis gegeben werden kann, so lässt sich auf diese Weise eine unerschöpfliche Menge von Farben vorführen, welche in verschiedenem Grade mit diesem oder jenem Grau verhüllt sind.

Absichtlich habe ich in diesem Paragraphen noch keine Rücksicht darauf genommen, dass bei den beschriebenen Verhüllungsmethoden einer bunten Farbe in gewissen Fällen eine unbeabsichtigte Änderung des Tones derselben eintreten kann; hiervon wird an einer anderen Stelle zu sprechen sein.

§ 15. Die Helligkeit der bunten Farben. In der Reihe der tonfreien Farben bestimmt sich die Helligkeit bezw. Dunkelheit der Farbe lediglich durch das Verhältnis zwischen ihrer Weiße und ihrer Schwärze. Nicht so einfach verhält es sich bei den bunten Farben, deren Helligkeit oder Dunkelheit nicht nur durch die Art ihrer schwarz-weißen Komponente, sondern auch durch die bunte Komponente mitbestimmt ist.

Sehr gewöhnlich werden bunte Farben, welche an Schwarz erinnern, dunkel genannt, man spricht von dunkelrot, dunkelblau u. s. w., wo es

sich um ein mit Schwarz oder Schwarzgrau verhülltes Rot oder Blau handelt. Von zwei freien Farben gleichen Tones nennt man die eine heller, die andere minderhell oder dunkel, ohne sich genauere Rechenschaft davon zu geben, wodurch sich eigentlich die eine Farbe von der anderen unterscheidet. Thatsächlich beruht jede Helligkeitsverschiedenheit zweier Farben gleichen Tones auf einer qualitativen Verschiedenheit derselben insofern, als entweder die eine Farbe freier ist als die andere, oder als bei gleicher Freiheit die eine mehr an Schwarz bezw. Weiß erinnert als die andere, oder dass beide Verschiedenheiten zugleich gegeben sind.

Wer die im vorhergehenden Paragraphen besprochenen Methoden zur Verhüllung der bunten Farben eingehender zur Anwendung bringt, kommt zur Erkenntnis, dass eine bunte Farbe ohne Änderung ihres Tones in sehr verschiedener Weise heller werden kann; ein Schwarzrot z. B. dadurch, dass das verhüllende Schwarz immer mehr zurück-, und das Bunte der Farbe entsprechend hervortritt, oder dadurch, dass an die Stelle des verhüllenden Schwarz ein Schwarzgrau, Grau oder Weißgrau tritt, ohne dass dabei die Freiheit des Rot sich zu ändern braucht.

Da mit wachsender Stärke der veranlassenden Strahlung unter sonst gleichbleibenden Umständen die Farbe heller wird, so vermengte sich unabsichtlich die Vorstellung einer zunehmenden Strahlungsintensität mit der Vorstellung wachsender Farbenhelligkeit, und da die erstere eine nur quantitative Änderung ist, gewöhnte man sich, auch die letztere als eine solche zu nehmen, und versäumte die Untersuchung der mit jeder Helligkeitsänderung gegebenen qualitativen Änderung der Farbe.

Nehmen wir ein mit einem Grau von beiläufig mittler Helligkeit verhülltes Blau an und denken uns sodann bei ganz unveränderter Deutlichkeit der Bläue und also gleichbleibendem Verhüllungsgrade an die Stelle der mittelgrauen Komponente eine weißgraue gesetzt, so wird die Farbe jetzt heller sein; dagegen würde sie dunkler sein, wenn ihre mittelgraue Komponente durch eine schwarzgraue ersetzt worden wäre. Wie aber wird sich die Helligkeit der Farbe verhalten, wenn wir uns bei unveränderter grauer Komponente und gleichem Verhüllungsgrade an die Stelle der blauen Komponente eine andere bunte, z. B. eine gelbe, gesetzt denken? Würde bei solchem Tausch die Helligkeit der Farbe unverändert bleiben?

Dies würde nur dann der Fall sein müssen, wenn der Farbenton als solcher keinen Einfluss auf die Helligkeit der Farbe hätte, und also die Helligkeit einer bunten Farbe lediglich von dem Verhüllungsgrade und der Art der schwarz-weißen Komponente der Farbe abhängig wäre.

Hiergegen aber spricht schon die Erfahrung, dass ein freies oder wie man zu sagen pflegt, »schönes, sattes« Blau stets dunkler ist als ein freies Gelb. Man suche sich z. B. aus seiner Sammlung bunter Papiere alle beiläufig urblauen und urgelben und aus diesen wieder das »schönste« blaue

und gelbe heraus, überziehe damit je ein kleines Glastäfelchen und lege dieselben nebeneinander, so wird das blaue dunkler erscheinen als das gelbe. Findet man zu einem möglichst freien Urblau ein Urgelb, von dem man nicht zu sagen weiß, ob es heller oder dunkler ist als das Blau, so wird ein Farbentüchtiger auch bei nur einiger Übung in der Farbenanalyse bemerken, dass das Gelb minder frei ist, als das Blau, dass es mehr oder weniger graulich oder schwärzlich ist. Hat er dagegen neben einem möglichst freien Gelb ein Blau vor sich, das ihm nicht entschieden dunkler erscheint als das Gelb, so wird er sehen, dass es weißlich ist. Oder man stelle auf ein niedriges Tischchen vor dem Fenster ein Stativ mit horizontalem Arm, welcher ein steifes graues Blatt (etwa 20 × 20 cm) so hält, dass es horizontal und etwa 50 cm über dem Tischchen liegt. In der Mitte dieses Blattes befinde sich ein Loch von 2—3 cm Durchmesser. Ferner seien zwischen dem Loche und der Tischplatte zwei kleine, um je eine horizontal und parallel zur Fensterfläche laufende Achse drehbare Glastafeln, deren eine mit dem blauen, die andere mit dem gelben Papier überzogen ist, so übereinander angebracht, dass man von oben herabschauend das Loch als ein halb blaues und halb gelbes Farbenfeld in der Fläche des grauen Papieres sieht (vgl. § 5). Liegt die eine Glasplatte so weit über der anderen, dass sie letztere nicht beschattet, so lässt sich die Stärke des von jeder Platte ins Auge geschickten Lichtes durch Drehung derselben um ihre horizontale Achse innerhalb weiter Grenzen variieren. Sind zunächst beide Platten horizontal, so erscheint die blaue Hälfte des Farbenfeldes dunkler als die gelbe. Dreht man jetzt die gelb überzogene Platte vom Lichte ab, so wird die gelbe Hälfte des Farbenfeldes dunkler und man kann sie soweit dunkler machen, dass man nicht mehr zu sagen weiß, welche Hälfte des Farbenfeldes die dunklere ist: dann wird man aber auch zugleich sehen, dass das Gelb der einen Hälfte viel weniger frei erscheint als das Blau der anderen. Es lässt sich übrigens so einrichten, dass der Beobachter gar nicht weiß, was unter dem Loche vorgeht. So oft die Platte gedreht wird, soll man wegblicken und überhaupt das Loch nie irgend länger fixieren.

Man überbrücke das horizontal liegende Loch eines am Fenster stehenden Dunkelkastens (vgl. § 16) mit zwei 1,5 cm breiten Glasstreifen in solchem Abstande voneinander, dass bei Betrachtung derselben durch das Polariphotometer (s. § 16) das ordinäre Bild des einen Streifens dicht neben dem extraordinären des anderen erscheint. Der mittlere Teil des einen Glasstreifens sei mit einem ebenfalls 1,5 cm breiten und 3 cm langen Stück des blauen, der mittlere Teil des anderen mit einem ebenso großen Stück des gelben Papiers beklebt. Dann sieht man durch das Polariphotometer ein quadratisches, halb blaues, halb gelbes Farbenfeld. Ist der Nicol auf 45° eingestellt und also das Verhältnis der Lichtstärken der beiden Pigment-

flächen dasselbe, wie bei Betrachtung mit freiem Auge, so erscheint die blaue Hälfte des Farbenfeldes dunkler als die gelbe; durch Drehung des Nicol lässt sich dann die Lichtstärke des blauen Bildes steigern, die des gelben schwächen. Sobald man unsicher wird, welche der beiden Farben die hellere ist, wird man zugleich bemerken, dass das Blau jetzt entweder freier erscheint, als das Gelb, oder wenn dies nicht auffallend wäre, dass es weißlich erscheint im Vergleich zum Gelb, welches daneben ins Grau spielt. Auch hier soll man jede längere Betrachtung des Farbenfeldes vermeiden und nur nach größeren Pausen schnell die Farben vergleichen. Bei diesem Versuche liegen die Farbenfelder in dunkler, bei dem vorhergehenden lagen sie in heller Umgebung.

Schon aus den soeben besprochenen Thatsachen scheint mir hervorzugehen, dass zwei Farben verschiedenen Tones, auch wenn sie ganz gleich frei wären, nicht notwendig auch gleiche Helligkeit zeigen müssten. Ich meine, dass es sich hier um etwas handelt, was im Wesen der verschiedenen Farbentöne und insbesondere der vier bunten Urfarben begründet und nicht auf irgendwelche nur accidentelle Umstände zurückzuführen ist. Wie das Weiß an sich eine helle, das Schwarz eine dunkle Sehqualität ist, so ist, meine ich, auch das Gelb an sich eine helle, das Blau an sich eine dunkle Sehqualität. Auch ein schönes, d. h. möglichst freies Urrot finde ich heller, als das freieste Urgrün, welches ich mir herzustellen vermag; doch ist mir der Helligkeitsunterschied hier viel weniger auffallend, als bei freiem Gelb und Blau.

Auf Grund des Gesagten und anderer, später zu besprechender Thatsachen und Erwägungen finde ich wahrscheinlich, dass wir drei qualitativ verschiedene Hell zu unterscheiden haben, das Weiß, das Gelb und das Rot, und ebenso drei Dunkel verschiedener Art, das Schwarz, das Blau und das Grün. Dementsprechend habe ich seinerzeit dem Gelb und Rot ein Eigenhell, dem Blau und Grün ein Eigendunkel zugeschrieben. Helligkeit ist hiernach eine den drei Urqualitäten des Gesichtssinnes Weiß, Gelb und Rot, Dunkelheit eine den drei Urqualitäten Schwarz, Blau und Grün inhärente Eigenschaft. Könnte aus irgendeiner gegebenen blauen Farbe ohne jede anderweite Änderung nur die Bläue schwinden, so würde die Farbe heller werden, und könnte aus einer gegebenen gelben Farbe nur die Gilbe schwinden, so würde sie dunkler werden, und beidenfalls würde nur der schwarz-weiße Bestandteil übrig bleiben, der jeder uns wirklich vorkommenden und auch der relativ freiesten bunten Farbe noch eigen ist. Einer absolut frei gedachten bunten Urfarbe dürften wir ebensowenig je nach den Umständen verschiedene Grade der Dunkelheit oder Helligkeit zuschreiben, wie dem absolut frei gedachten Schwarz oder Weiß. Ein zunächst absolut freies Schwarz lässt sich mehr oder weniger mit Weiß verhüllt und also ins Grau spielend denken, aber das Schwarz an und für

sich könnte nicht das eine Mal heller, das andere Mal dunkler sein, und dasselbe gilt vom absolut frei gedachten Urblau oder Urgrün. Ein zunächst absolut frei gedachtes Weiß lässt sich in verschiedenem Maße mit Schwarz verhüllt denken, aber an und für sich könnte es nicht bald heller, bald dunkler sein, und dasselbe gilt vom absolut frei gedachten Urgelb und Urrot.

Die Helligkeit oder Dunkelheit einer bunten Farbe ist nach dieser Auffassung das Ergebnis des Eigenhell und Eigendunkel der einzelnen Urfarben, welche als die Urkomponenten jener Farbe gemäß dem verschiedenen Verhältnis ihrer Deutlichkeit die Qualität der Farbe bestimmen. Jeder uns wirklich vorkommenden Farbe ist ein bestimmtes Hell-Dunkel eigen, und je nachdem uns das Hell oder das Dunkel derselben deutlicher ist, nennen wir sie eine helle oder eine dunkle. Für die schwarz-weißen Farben ist dies von vornherein klar: je nachdem uns ihre schwarze oder ihre weiße Komponente deutlicher ist, bezeichnen wir die Farbe als eine helle oder eine dunkle.

Eine bunte Farbe lässt sich im allgemeinen als aus vier Urkomponenten bestehend auffassen, zwei bunten und den beiden tonfreien (Weiß und Schwarz); nur den Farben vom Tone einer Urfarbe ist nur *eine* bunte Urkomponente eigen. In jeder rot-gelben Farbe, z. B. Orange, hätten wir somit drei helle Urkomponenten (Rot, Gelb, Weiß) und eine dunkle (Schwarz) zu unterscheiden, in jeder grün-blauen aber drei dunkle (Grün, Blau, Schwarz) und eine helle (Weiß). Die rot-blauen und grün-gelben Farben aber würden zwei helle und zwei dunkle Urkomponenten haben.

Aus dem Gesagten ergeben sich u. a. folgende Regeln:

Wenn zwei Farben gleichen Tones und gleicher Freiheit verschieden hell sind, so ist dies in der Verschiedenheit ihrer schwarz-weißen Komponente begründet.

Zwei Farben von verschiedenem Ton können trotz gleicher Freiheit und gleicher Art ihrer schwarz-weißen Komponente verschieden hell sein.

Bei gleicher Art der schwarz-weißen Komponente ist eine gelbe, rote oder gelb-rote Farbe um so heller, eine blaue, grüne oder blau-grüne um so dunkler, je deutlicher das Bunte der Farbe im Vergleich zur schwarz-weißen Komponente ist.

In der kurzen Skizze einer Theorie des Lichtsinnes, welche ich im Jahre 1874 veröffentlicht habe, war angenommen, dass bunte Farben, gleichviel welchen Tones, bei ganz gleichem Grade der Verhüllung und ganz gleicher Art ihrer schwarz-weißen Komponente gleichhell erscheinen würden. Ich bin jedoch bald von dieser Ansicht zurückgekommen, wie ich auch im Jahre 1886 gelegentlich (14, S. 18 und 19) bereits mitgeteilt habe. Franz Hillebrand, welcher nachher mit mir über die vorliegende Frage arbeitete, hat das, was ich hier das Eigenhell oder Eigendunkel der Farbentöne genannt habe, als *specifische Helligkeit* derselben bezeichnet (15).

Irrtümlich ist die Angabe von HELMHOLTZ (2, S. 378), nach welcher ich »die Empfindung der Helligkeit mit der Weißempfindung identifiziert« und behauptet haben soll, »mit der reinen Blau- oder Gelbempfindung sei keine Empfindung von Helligkeit verbunden«. Diese Angabe ist mir um so unverständlicher, als ich in der erwähnten Skizze über den Einfluss, welchen die bunte Komponente einer Farbe auf deren Helligkeit hat, in ganz besonders ausführlicher und ein derartiges Missverständnis völlig ausschließender Weise gesprochen habe.

III. Abschnitt.

Über die Beziehungen zwischen den Unterschieden der Lichtstärken der wirklichen Dinge und den tonfreien Helligkeitsunterschieden der Sehdinge.

§ 16. Messung der Lichtremission tonfreier Papiere. Im vorigen Abschnitte haben uns nur die Farben oder Sehqualitäten als solche ohne Rücksicht auf die äußeren oder inneren Ursachen ihres Eintretens beschäftigt und wir nahmen die optischen Strahlungen nur zu Hilfe, um uns das Objekt unserer Untersuchung, nämlich die einzelnen Farben oder Farbenreihen zur Anschauung zu bringen. Nunmehr kommen wir zur Erörterung der Regeln oder Gesetze, nach welchen die Farben von den das Auge treffenden Strahlungen abhängen, und zwar sollen zunächst in diesem Abschnitte nur die schwarz-weißen Farben in ihrer Abhängigkeit von der Stärke der bezüglichen Strahlungen in Betracht gezogen werden. Für einen Teil der hier zu besprechenden Thatsachen ist die Feststellung des Intensitätsverhältnisses der Strahlungen notwendig, welche von den beobachteten Flächen ins Auge geschickt werden, daher zunächst einige dazu dienende Methoden zu erörtern sind.

Von verhältnismäßig seltenen Ausnahmen abgesehen geben die Außendinge unserem Auge nur zurückgeworfenes Licht, welches sie von der beleuchteten Himmelsfläche oder von den beleuchteten Zimmerwänden u. s. w. oder endlich unmittelbar von der Sonne oder künstlichen Lichtquellen empfangen haben und zu einem mehr oder weniger großen Teile regelmäßig oder unregelmäßig reflektieren. Bei unveränderter Lage unseres Auges und des beleuchteten Außendinges einerseits, unveränderter Form, Lage und Art der Beleuchtungsquellen andererseits ist die Lichtmenge, welche ein Flächenelement von dem empfangenen Lichte uns zusendet, proportional zur Intensität der Beleuchtung. Dies bedeutet zugleich, dass die Unterschiede der Lichtstärken je zweier Teile des Gesichtsfeldes proportional mit der Stärke der Gesamtbeleuchtung wachsen und abnehmen.

Eine Fläche, welche bei beliebiger Richtung des auffallenden Lichtes nur vollkommen zerstreutes Licht zurückgeben würde, könnten wir eine absolut matte nennen. Die beleuchteten Papierflächen, mit denen wir unsere Unter-

suchungen vielfach anstellen werden, zeigen jedoch meist noch einen in Betracht kommenden Rest von regelmäßiger Reflexion. Als matte Flächen im besten Sinne des Wortes sind eine gut berußte oder eine mit dem Rauche brennenden Magnesiums geweißte Fläche zu bezeichnen; doch sind dieselben so empfindlich gegen jede Berührung, dass sie nur in ganz besonderen Fällen brauchbar sind.

Die möglichst matten Papierflächen, mit denen wir es zu thun haben werden, sind entweder solche, welche von allen leuchtenden homogenen Strahlungen angenähert denselben Bruchteil zurückgeben, so dass das remittierte Strahlgemisch fast dieselbe Zusammensetzung hat, wie das auffallende; oder sie besitzen für die verschiedenen Strahlenarten ein verschiedenes Remissionsvermögen. Ersteres gilt mit mehr oder weniger großer Annäherung von den bei Tageslicht weiß, grau und schwarz erscheinenden, letzteres von den bunten Papieren.

Das Remissionsvermögen einer Fläche ist zu unterscheiden von der für unser Auge in Betracht kommenden Lichtstärke derselben, d. i. die von der Flächeneinheit in der Richtung nach unserer Pupille ausgesandte Lichtmenge. Die letztere steigt und fällt wie gesagt proportional mit der Beleuchtung der Fläche, während das Remissionsvermögen, welches sich nach dem Verhältnis des remittierten zum auffallenden Lichte bemisst, dabei unverändert bleibt. Das Remissionsvermögen ist ferner streng zu unterscheiden von der Helligkeit der Fläche; denn diese ist nach unserer Definition eine Eigenschaft der Farbe, welche durch das von der Fläche auf unsere Netzhaut geschickte Licht in unserem Sehfelde veranlasst wird.

Für unsere Untersuchungen an ebenen tonfreien Papieren ist die Kenntnis der Lichtstärke der gesehenen Fläche (im soeben definierten Sinne) meist nicht erforderlich, sondern nur die Kenntnis des Verhältnisses, in welchem die Lichtstärken zweier oder mehrerer Teile einer ebenen Fläche zueinander stehen, z. B. zweier in derselben Ebene liegender und von derselben Lichtquelle möglichst gleichstark beleuchteter tonfreier (weißer, grauer oder schwarzer) Papiere, wenn unsere Gesichtslinie beiläufig rechtwinklig zu deren Ebene liegt. Deshalb bedürfen wir auch nicht der Kenntnis des Remissionsvermögens selbst, sondern nur des Verhältnisses zwischen den Remissionsvermögen der verschiedenen Papiere.

Dementsprechend setzen wir das Remissionsvermögen desjenigen von den benutzten Papieren, welches den größten Bruchteil des empfangenen Lichtes zurückwirft und also das größte Remissionsvermögen hat, gleich 360, benutzen dieses unter gewöhnlichen Umständen weiß erscheinende Papier als Normalpapier und bemessen hiernach das Remissionsvermögen der übrigen weißen, grauen oder schwarzen Papiere. Einem Papiere, welches unter genau denselben Versuchsbedingungen nur halb soviel Licht als wie

das Normalpapier in der Richtung nach unserer Pupille hin zurückschickt, schreiben wir also das Remissionsvermögen 180 zu u. s. w.

Zur Bestimmung dieses relativen Remissionsvermögens bedienen wir uns entweder des Farbenkreisels oder eines Polariphotometers.

Die Messung am Kreisel erfolgt nach einem im wesentlichen schon von Adolf Fick (16) angegebenen Verfahren.

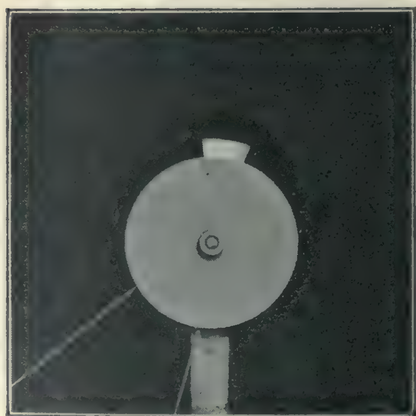
Wenn man am Farbenkreisel eine weiße Kreisscheibe, an deren Peripherie ein von zwei Radien und einem Parallelkreise begrenzter Ringsektor ausgeschnitten ist (vgl. Fig. 7), vor einem völlig lichtlosen Hintergrunde schnell genug rotieren lässt, so erscheint die Scheibe von einem dunkleren

Fig. 7.



Ringe umsäumt. Die Farbe desselben ist nach dem Talbot'schen Gesetz gleich der Farbe einer Fläche, deren Lichtstärke sich zur Lichtstärke der weißen Scheibe ebenso verhält, wie die Bogenlänge des vom peripheren Ringe der letzteren noch vorhandenen Sektors zum ganzen Ringe (von 360°).

Fig. 8.

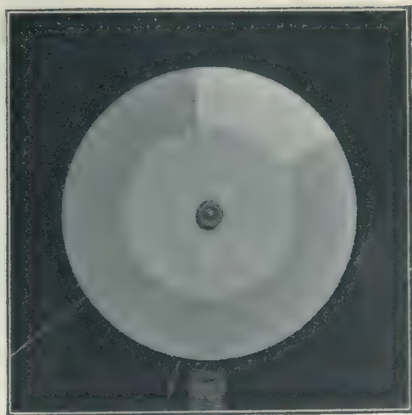


Fertigen wir also die weiße Scheibe aus unserem Normalpapier, legen auf dieselbe eine kleinere Scheibe des zu untersuchenden Papiers, von welcher die erstere mit Ausschluss des freibleibenden Ringsektors verdeckt wird (vgl. Fig. 8), und geben diesem Sektor eine solche Bogenlänge, dass während des Rotierens Ring und Scheibe genau dieselbe Farbe zeigen, so drückt uns die nach Graden bemessene Bogenlänge des Ringsektors das relative Remissionsvermögen oder, wie ich es kurz nennen will, den Kreiselwert (*K W*) des untersuchten Papieres aus.

Um die passende Bogenlänge des Ringsektors der Normalscheibe zu finden, benützt man zunächst eine solche mit zu kleinem Ringsektor, so dass beim Rotieren der periphere Ring dunkler erscheint als die aufliegende Scheibe des zu untersuchenden Papiers. Unter die Normalscheibe legt man sodann eine zweite mit gleichgroßem oder etwas kleinerem Ringsektor so, dass der hintere Ringsektor zunächst vom vorderen verdeckt wird, durch

Verschieben der beiden Scheiben gegeneinander aber mit einem immer größeren Teile sichtbar gemacht werden kann, bis während des Rotierens Ring und Scheibe dieselbe Farbe zeigen. Zur Herstellung eines möglichst lichtfreien Hintergrundes für die rotierenden Scheiben dient nach dem Vorgange ADOLF FICK's (16) ein länglicher Kasten von quadratischem Querschnitt oder ein Rohr, von beispielsweise 80 cm Länge und 30 cm Querdurchmesser, welche abgesehen von einer, an der einen Querfläche befindlichen Öffnung gänzlich geschlossen und innen mit schwarzem Sammet ausgekleidet sind. Aus der relativ kleinen Öffnung kehrt nahezu gar kein Licht zurück. Fig. 8 zeigt einen vor der Öffnung eines solchen Dunkelkastens aufgestellten Kreisel mit der zu eichenden Scheibe und dem die letztere überragenden Sektor des weißen Normalpapieres. Hat man auf diese Weise den Kreiselwert eines grauen Papiers bestimmt, so kann man nach einer zweiten einfacheren Methode mit Hilfe dieses geeichten und des Normalpapiers den Kreiselwert jedes anderen Papieres feststellen. Erscheint dasselbe, auf den Kreisel gebracht, heller als das geeichte, so fertigt man aus dem letzteren und aus dem Normalpapier je eine größere Scheibe, durchschneidet (nach dem Vorgange MASSON's) beide vom Zentrum bis zur Peripherie entlang einem Radius und steckt die so geschlitzten Scheiben derart ineinander, dass von jeder nur ein Sektor sichtbar ist, während ihre peripheren Ränder sich decken. Auf diese Doppelscheibe legt man eine kleinere Scheibe des zu untersuchenden Papiers, wie dies Fig. 9 zeigt. Während des Rotierens erscheint nun diese Innenscheibe von einem entweder helleren oder dunkleren Ringe umgeben. Durch passende Änderung des Sektorenverhältnisses der großen Scheiben aber kann man es dahin bringen, dass Ring und Innenscheibe ganz gleich erscheinen. Der Kreiselwert ($K\,W$) der Innenscheibe ist dann leicht zu berechnen.

Fig. 9.



Beispiel: Zur Gleichung zwischen Ring und Innenscheibe sei erforderlich ein Sektor von 150° des Normalpapiers und ein Sektor von 210° des geeichten grauen Papiers. $K\,W$ des letzteren betrage 81, $K\,W$ des ersteren beträgt 360. Demnach ist $K\,W$ des Papiers der Innenscheibe $= 150 + \frac{210 \times 81}{360} = 197{,}25$.

Ist das zu untersuchende Papier dunkler als das bereits geeichte, so muss man die Scheiben, welche den Außenring geben sollen, aus dem zu untersuchenden und dem Normalpapier anfertigen, die kleinere Innenscheibe aber aus dem geeichten.

Übrigens thut man gut, sich nicht mit der Eichung eines einzigen Papiers nach der ersterwähnten Methode zu begnügen, sondern aus der Reihe der zur Verfügung stehenden tonfreien Papiere mehrere nach dieser Methode zu eichen und die Ergebnisse dieser Messungen mit Hilfe der zweiten Methode zu kontrollieren, überhaupt durch zweckmäßige Kombination beider Methoden die unvermeidlichen Fehler der Einzelmessungen möglichst zu eliminieren.

Fig. 10.



Als Kreisel kann jede zureichend schnell rotierende Achse dienen, die über das eine Achsenlager hinausragt, hier mit einem Schraubengewinde versehen ist und nahe dem freien Ende eine kleine ebene Metallmanschette trägt. Die mit einem passenden centralen Loche versehenen Scheiben werden auf das Endstück der Achse geschoben und mittels einer Schraubenmutter an die Manschette angepresst. Zweckmäßig ist es, den Apparat so einzurichten, dass die Scheiben ebensowohl in horizontaler als in vertikaler Lage rotieren können. Fig. 10 zeigt einen von mir benutzten Farbenkreisel mit zwei Scheiben, der in beiden Lagen verwendbar ist und ebensowohl mit der Hand als durch einen Motor in Gang gesetzt werden kann.

Die Drehungsgeschwindigkeit muss mindestens so groß sein, dass auch bei beliebig indirektem Sehen und rasch hin- und herbewegtem Auge an der Scheibe

keinerlei Flimmern bemerkbar ist. Die hierzu nötige Geschwindigkeit ist sehr verschieden je nach der absoluten Lichtstärke der Papiere, dem Unterschiede bezw. Verhältnisse dieser Lichtstärken, der Lichtstärke ihrer Umgebung, dem Größenverhältnis der Sektoren, dem Anpassungszustande des Auges und wohl auch der Individualität des Auges, daher sich eine bestimmte Zahl nicht angeben lässt. Wenn sich an dem gegebenen Kreisel die erforderliche Drehungsgeschwindigkeit, die bei starker Beleuchtung über 60 Drehungen in der Sekunde hinausgehen kann, nicht erreichen lässt, kann man jeden Sektor durch zwei von z. B. halber Größe ersetzen, so dass bei jeder Umdrehung ein mehrmaliger Sektorenwechsel erfolgt. Hierzu braucht man also die doppelte Scheibenzahl.

Der Kreisel darf vom Beobachter erst dann betrachtet werden, wenn er die nötige Drehungsgeschwindigkeit bereits erreicht hat, daher es zweckmäßig ist, ihn in der Zeit von einer Beobachtung zur anderen durch einen vorgesetzten grauen Schirm zu verdecken.

Hinter bezw. unter den Masson'schen Scheiben muss sich stets eine ungeschlitzte Scheibe aus nicht zu dünnem Papier befinden, und die Drehung muss in der Richtung erfolgen, bei welcher der Luftwiderstand die Scheiben nicht aufblättert, sondern vielmehr aneinander drückt. Ist also der Kreisel nur in einer Richtung drehbar, so müssen die Scheiben dementsprechend ineinander geschoben sein.

Wenn das Normalpapier oder die untersuchten Papiere eine noch in Betracht kommende Lichtmenge durchlassen, so ist ihr Kreiselwert mit von ihrer Unterlage abhängig und man benutzt sie dann nur in wenigstens doppelter Lage.

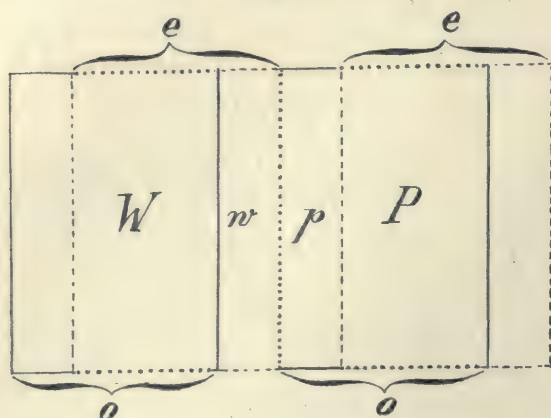
Die kleinen Scheiben werden zweckmäßiger Weise mit einer Maschine ausgeschnitten (gestanzt), weil sonst ihr Umriss während der Drehung keine scharfe Linie bildet. Das Loch der großen Scheibe wird mittels eines Locheisens ausgeschlagen. Zum Schlitzen der Scheiben dient eine horizontale Metallscheibe mit centralem cylindrischen Zapfen vom Durchmesser des Loches der Scheibe. Nachdem letztere aufgelegt ist, wird über den Zapfen ein kleiner Hohlcylinder geschoben, welcher seitlich von seiner unteren Öffnung ein kurzes horizontales Lineal trägt, dessen eine, abgeschrägte Kante einem Radius der Scheibe entspricht. Das entlang dieser Kante geführte Messer schlitzt die Scheibe genau radial.

Mit dem Polariphotometer, wie ich es nennen will, lässt sich die relative Lichtstärke oder der Kreiselwert einer ganz ebenen und homogenen tonfreien Papierfläche in folgender Weise messen:

Man denke sich den erwähnten Dunkelkasten auf dem Fußboden stehend, so dass die mit der Öffnung versehene Fläche oben liegt. Auf letztere legt man ein ganz ebenes Stück des Normalpapieres derart, dass ein Teil der lichtlosen Öffnung von dem geradlinig begrenzten Papiere verdeckt wird. Durch ein über der Öffnung aufgestelltes doppelbrechendes Prisma erscheint das Papier (W) doppelt, wie es Fig. 11 darstellt, in welcher das nur von unterbrochenen Linien begrenzte Rechteck e beispielsweise das extraordinäre, das Rechteck o das ordinäre Bild bedeuten möge. Dem Streifen w entspricht also jetzt die halbe Lichtstärke des Normalpapiers. Man schiebt nun von der anderen Seite her ein ebenfalls geradlinig begrenztes Stück des zu eichenden Papieres P soweit über die Öffnung, dass

die Grenzlinie seines ordinären Bildes (*o*) die des extraordinären Bildes (*e*) des Normalpapieres eben berührt. Der Streifen *p* dieses Bildes hat die halbe Lichtstärke des untersuchten Papieres. Ein über dem doppelbrechenden Prisma befindlicher Nicol sei zunächst so orientiert, dass er die extraordinären Bilder und also auch den Streifen *w* vollständig auslöscht, die ordinären Bilder aber und also den Streifen *p* in der maximalen Lichtstärke sehen lässt. Wird der Nicol aus dieser Lage soweit gedreht, bis der dabei zunehmend heller werdende Streifen *w* dem sich zunehmend verdunkelnden Streifen *p* ganz gleich erscheint, und ist φ der hierzu erforderliche Drehungswinkel, so ist der Kreiselwert des untersuchten Papieres $= 360\ tg^2\ \varphi$.

Fig. 11.



Nach dieser Methode lässt sich auch mit Hilfe jedes bereits geeichten Papieres statt des Normalpapieres der Kreiselwert eines beliebigen Papieres bestimmen, wenn statt des Kreiselwertes 360 des Normalpapieres der des geeichten in die Formel eingesetzt wird.

Beide Papiere sollen ganz eben sein und in derselben Ebene liegen, und die durch die Achse des Photometers gehende Gesichtslinie soll senkrecht auf dieser Ebene stehen. Um das Auge vor anderweitem Lichteinfall zu schützen, wird über den oberen Randteil des den Nicol enthaltenden Rohres ein hohler, luftgefüllter Kautschukring geschoben, welcher sich lichtdicht und so fest an die Umgebung des Augapfels anschmiegt, dass das Rohr während der Drehung in dem Ringe gleitet. Insoweit das von den Papieren zurückgeworfene Licht nicht völlig frei von polarisiertem ist, ergiebt sich ein Messungsfehler.

Als Normalpapier leistet ein mattes Barytpapier gute Dienste. Lichtlose schwarze Papiere giebt es nicht, auch die lichtschwächsten haben noch einen erheblichen Kreiselwert. Ich fand denselben im Mindestfalle gleich 6. Das mit schwarzem Wollstaub belegte Tapetenpapier (Wollpapier) hat zwar zuweilen einen noch etwas geringeren Kreiselwert, reißt aber leicht bei großer Drehungsgeschwindigkeit, weil es relativ schwer und meist aus schlechtem Papier hergestellt ist; doch ist es nicht so empfindlich wie ein ganz mattes schwarzes Papier, welches sehr leicht glänzende Flecken bekommt. Eine mittels einer Gasflamme hergestellte Rußfläche fand ich bei gleicher Beleuchtung bestenfalls nur sehr wenig lichtschwächer als das Wollpapier.

§ 17. Deutlichkeit des Sehens im Verlaufe eines Tages. Wenn innerhalb der Grenzen brauchbarer Beleuchtung die in § 6 erörterte Farbenbeständigkeit der Sehdinge eine genaue wäre, so würden unter

sonst gleichen Umständen bei Änderungen der Beleuchtungsstärke auch alle Farben*unterschiede* oder, wie wir hier auch sagen können, alle Helligkeitsunterschiede unverändert bleiben. In der That lehrt die Erfahrung, dass trotz der täglichen sehr großen Intensitätsänderungen der Beleuchtung, die sich im allgemeinen sehr langsam vollziehen, die Helligkeitsunterschiede der Sehdinge sich nur wenig ändern, weil das Auge mit seinen Anpassungen den Änderungen der Beleuchtung folgt. Insoweit aber doch bei Änderungen der Beleuchtung eines im übrigen (in sich und in bezug auf den Ort des Auges) unveränderten Gesichtsfeldes eine Zu- oder Abnahme der Helligkeitsunterschiede eintritt, müssen auch Änderungen der bezüglichen Helligkeiten selbst erfolgen, sei es dass von je zwei Farben die eine weißlicher d. i. heller, oder schwärzlicher d. i. dunkler wird, während die andere unverändert bleibt, oder dass beide sich in derselben Richtung, aber in verschiedenem Maße ändern, oder endlich, dass die eine heller und die andere dunkler wird als zuvor. Alle diese Fälle kommen bei Änderungen der Gesamtbeleuchtung eines im übrigen unveränderten Gesichtsfeldes thatsächlich vor.

Gleiches Außending, gleiche Schärfe seines Netzhautbildes und gleiche Aufmerksamkeit vorausgesetzt ist die Deutlichkeit des Sehens größer oder kleiner, je nachdem die Farbenverschiedenheiten, d. h. also bei tonfreien Farben ausschließlich die Helligkeitsverschiedenheiten der korrelativen Sehdinge größer oder kleiner sind. Nicht auf die Helligkeiten bezw. Dunkelheiten an sich, sondern lediglich auf ihre Verschiedenheiten kommt es hierbei an. Was am meisten von seiner Umgebung absticht, fällt auch zumeist ins Auge. Eine Schrift ist unter sonst gleichen Umständen um so deutlicher, je dunkler sie im Vergleich zum Papier erscheint; Buchstaben, welche grau auf weißem Grunde oder schwarz auf grauem Grunde erscheinen, sind minder bequem zu lesen als die schwarz auf Weiß erscheinenden. Wenn wir bei einer »guten« Beleuchtung deutlicher sehen als bei einer zu schwachen, *so beruht dies nicht, wie das gewöhnlich angenommen wird, darauf, dass ersterenfalls alle Dinge heller erscheinen, sondern darauf, dass alle Farbenverschiedenheiten jetzt größer sind als bei der zu schwachen Beleuchtung.*

Ist eine Schrift mangelhaft beleuchtet, so liest sie sich schwierig, auch wenn sie relativ groß ist, weil die Farbenverschiedenheit zwischen Buchstaben und Grund zu klein ist. Das *Sehen* der Schrift bei schwacher Beleuchtung ermüdet an sich nicht, wohl aber das *Lesen* derselben; es handelt sich nicht um eine Ermüdung des Auges, sondern des Gehirns; die Anspannung der Aufmerksamkeit ist das Ermüdende, nicht der Lichtreiz. Wir gehen in solchem Falle mit der Schrift näher ans Fenster, nicht um feinere Einzelheiten an den Buchstaben sehen zu können, was nur bei zu kleiner Schrift nötig wäre, sondern um die Buchstaben leichter vom Grunde zu

unterscheiden. Wenn man ein beschriebenes oder bedrucktes Blatt zur einen Hälfte gut, zur anderen schlecht beleuchtet, so sieht man, dass die Farbenverschiedenheit zwischen Buchstaben und Grund auf der ersteren Hälfte größer ist als auf der letzteren.

Die günstigste Beleuchtung ist also nicht bloß dann von Vorteil, wenn es sich um die Wahrnehmung feiner Einzelheiten handelt, sondern auch, wenn uns auf letztere gar nichts ankommt. Für die feinen Einzelheiten ist die bessere Beleuchtung allerdings absolut unentbehrlich, für das übrige aber nur relativ. Schon ehe bei abnehmendem Tageslicht die zarten Haarstriche der Buchstaben untermerklich werden, beginnt beim Lesen eine gewisse Anstrengung.

Der Größe der Verschiedenheit zweier tonfreier Farben entspricht auf der theoretischen Farbenlinie (vgl. § 11) ihr gegenseitiger Abstand. Die Größe dieser Farbenabstände ist also unter sonst gleichen Umständen das bestimmende für die Deutlichkeit des Sehens; auf welchen Orten jener Farbenlinie die bezüglichen Farben liegen, ob näher dem schwarzen oder dem weißen Ende derselben, ist bei gleichem Abstand der Farben für die Deutlichkeit unwesentlich. Ein dunkles Gebilde kann auf einem dunklen Grunde deutlicher gesehen werden, als ein helles von ganz gleicher Form und Größe auf einem hellen Grunde, wenn nur ersterenfalls der Abstand zwischen der Farbe des Dinges und der des Grundes, d. i. hier also der Dunkelheitsunterschied, größer ist als letzterenfalls der Helligkeitsunterschied.

Die tägliche Erfahrung lehrt, dass die Größe der Farbenverschiedenheiten unter sonst gleichbleibenden Umständen von der Stärke der Beleuchtung abhängig ist. Wenn wir bei noch ganz finsterer Nacht erwachen, unterscheiden wir zunächst von den Außendingen gar nichts, sondern sehen das ganze Sehfeld lediglich erfüllt von jenen schwachen, mehr oder minder unstetigen, wolkigen oder fleckigen Farben, welche man als das Eigengrau (Eigenhell oder Eigendunkel) des längere Zeit verfinstert gewesenen Auges bezeichnen kann. Warten wir nun den Tagesanbruch ab, so tauchen allmählich einzelne größere Teile des Gesichtsfeldes mit noch ganz verwaschenen Umrissen aus jenem Eigengrau wie aus einem Nebel auf. Obwohl schon jetzt kein Teil des Gesichtsfeldes ganz lichtlos ist, sondern alle Außendinge bereits mehr oder weniger Licht ins Auge schicken, so sehen wir doch trotz der hochgesteigerten Lichtempfindlichkeit des lange verfinstert gewesenen Auges die lichtschwächsten Teile des Gesichtsfeldes keineswegs an Helligkeit zunehmen, sondern vielmehr um so dunkler hervortreten, je heller die lichtstärkeren werden. Das mit der zunehmenden Beleuchtung bemerkliche Wachsen der Farbenverschiedenheiten der sichtbaren Dinge ist also keineswegs dadurch bedingt, dass die Helligkeiten aller dieser Dinge zunehmen — nur aber die der lichtschwächeren langsamer als die der lichtstärkeren —, sondern während die Helligkeit der

relativ lichtstarken über das anfängliche Eigenhell des Auges immer mehr hinauswächst, sinkt die der relativ sehr lichtschwachen unter jenes Eigenhell hinab, so dass sie mit zunehmender Beleuchtung immer dunkler, schwärzlicher und schließlich tiefschwarz erscheinen können, obwohl ihre geringe Lichtstärke mit der zunehmenden Beleuchtung ebenfalls gewachsen ist.

Während also beim Beginn der Morgendämmerung die Farben aller Teile des Sehfeldes auf einer relativ kleinen, zur grauen Mittelstrecke der theoretischen Farbenlinie gehörigen Strecke zusammengedrängt sind, dehnt sich die Strecke der gesehenen Farben bei zunehmender Beleuchtung des Gesichtsfeldes nach beiden Seiten hin, nicht nur in den Bezirk der weißen, sondern auch den der schwarzen Farben, immer weiter aus, und damit wächst zugleich die Größe aller Farbenverschiedenheiten der Sehdinge. An jeder großen Druckschrift kann man unter den beschriebenen Umständen bemerken, wie die Farbenverschiedenheit zwischen den Buchstaben und dem Papier mit abnehmender Dämmerung zusehends wächst, die Buchstaben schwärzer werden und das Papier weißer.

Mit diesem Wachsen aller Helligkeitsverschiedenheiten ist nun auch die wachsende Deutlichkeit des Sehens gegeben. Auf einem Felde, welches anfangs überall beiläufig dieselbe Farbe (dieselbe Helligkeit bezw. Dunkelheit) zeigte, treten jetzt immer zahlreichere, anfangs nur eben merkliche, später immer deutlichere Verschiedenheiten hervor, d. h. man sieht immer mehr Einzelheiten; in den dunklen Bezirken eines Kupferstiches z. B. zeigen sich immer schwärzere, in den hellen Bezirken immer weißere Einzelheiten, immer deutlichere Abstufungen der Helligkeit bezw. Dunkelheit.

Wenn dann mit zunehmender Sonnenhöhe die Beleuchtung stärker und stärker wird, so werden die dadurch bedingten Zunahmen der Farbenunterschiede immer weniger merklich, und ohne besonders darauf gerichtete Aufmerksamkeit kann man leicht zu der Meinung kommen, dass, wenn einmal die Beleuchtung eine gewisse mäßige Stärke erreicht hat, das weitere Wachsen derselben eine Zunahme der Farbenunterschiede nicht mehr mit sich bringe. Demgegenüber braucht nur daran erinnert zu werden, dass man eine z. B. zum Lesen oder Schreiben völlig bequeme Beleuchtungsstärke nicht mehr zureichend findet, sobald man sich mit feineren Dingen und zarteren Helligkeitsabstufungen beschäftigen will, als wie solche beim Lesen oder Schreiben in Betracht kommen. Man beseitigt dann wohl einen Fenstervorhang oder rückt näher an das Fenster. Dass man nun besser sieht, verdankt man, abgesehen von dem leicht auszuschließenden Einflusse einer etwaigen Pupillenverengung, der Vergrößerung der Farbenunterschiede. Dieselbe beruht vorwiegend darauf, dass die lichtstärkeren Teile des Gesichtsfeldes jetzt weißer erscheinen, während, was man übersehen hat, die lichtschwachen teils unverändert, teils schwärzlicher erscheinen als

zuvor. Die äußerst feine Schraffierung eines Kupferstiches oder einer Phototypie kann bei einer im übrigen ganz bequemen Beleuchtung unmerklich sein, bei gesteigerter Beleuchtung aber deutlich werden, weil der untermerkliche Farbenunterschied zwischen Linien und Grund sich zu einem merklichen vergrößert hat. An feinen, sogenannten schwarzen Linien auf weißem Grunde kann man bei darauf gerichteter Aufmerksamkeit sehen, dass dieselben bei schwächerer Beleuchtung eigentlich grau und erst bei guter Beleuchtung schwarz erscheinen.

Alle diese, infolge wachsender Farbenverschiedenheiten eintretenden Zunahmen der Deutlichkeit des Sehens erfolgen allerdings auf Kosten der Konstanz der Farben der Sehdinge. Da aber dabei, soweit es sich nur um das Gebiet der brauchbaren Beleuchtungen handelt, alles Weiße nur noch weißer, das Schwarze nur noch schwärzer wird und alles Graue grau bleibt, wenn es sich auch in ein weißlicheres oder schwärzlicheres Grau verwandeln kann, so bewahren die Außendinge dabei doch wenigstens im wesentlichen ihre Farben, wie es dem in § 6 erörterten Satze von der angenäherten Farbenbeständigkeit der Sehdinge entspricht.

§ 18. Einfluss der successiven Anpassung des Auges auf die Deutlichkeit des Sehens. Betritt man nach längerem Aufenthalte in einem gut beleuchteten Raume einen nur schwach beleuchteten, oder setzt man die Beleuchtung des ersteren schnell und erheblich herab, so unterscheidet man zunächst weniger, bezw. gar nichts. Sehr bald aber wächst das Unterscheidungsvermögen wieder, anfangs schnell, dann immer langsamer, bis es die ihm durch das Ausmaß der jetzt herrschenden Beleuchtung gezogene Grenze erreicht hat. Gleichwohl bleibt, wenn die Herabsetzung der Beleuchtung eine erheblichere war, die Deutlichkeit des Sehens auch dann noch ganz merklich hinter derjenigen zurück, welche bei der stärkeren Beleuchtung bestand.

Kehrt man jetzt aus dem schwach beleuchteten Raume in den stark beleuchteten zurück oder verstärkt die Beleuchtung des ersteren wieder, so fühlt man sich mehr oder weniger geblendet und unterscheidet zunächst abermals weniger, bis die Deutlichkeit des Sehens allmählich wieder ihr anfängliches Maß erreicht.

Jede schnelle und größere Änderung der Beleuchtungsstärke des Gesichtsfeldes bedingt also zunächst eine sehr merkliche Herabsetzung der Deutlichkeit des Sehens; erst wenn das Auge sich an die neue Beleuchtung gewöhnt und sich derselben vollständig angepasst hat, leistet es in bezug auf die Deutlichkeit des Sehens das Maximum dessen, was ihm bei der gegebenen Beleuchtung möglich ist.

Die angeführten Thatsachen lehren zugleich, dass das längere Zeit im

schwächer beleuchteten Raume gewesene Auge im stärker beleuchteten trotz der größeren Lichtstärke aller Außendinge anfangs sogar weniger leistet, als zuvor bei der schwachen Beleuchtung, und dass umgekehrt das für ein stark beleuchtetes Gesichtsfeld adaptierte Auge für das schwach beleuchtete solange fast unbrauchbar ist, bis es sich für letzteres wieder angepasst hat. Die verschiedenen Grade der allgemeinen Beleuchtung erfordern also verschiedene Anpassungszustände des Auges, und umgekehrt entspricht jedem Anpassungszustande eine besondere für diesen Anpassungszustand optimale Beleuchtungsstärke, wenn das Auge das unter den gegebenen Verhältnissen mögliche Maximum der Deutlichkeit des Sehens erreichen soll.

Dieses Maximum ist bei verschiedenen Anpassungszuständen und den zugehörigen optimalen Beleuchtungsstärken ein verschiedenes und also im allgemeinen ein nur relatives. Ein für schwache Beleuchtung angepasstes Auge erreicht bei keiner und also auch nicht bei der zugehörigen optimalen Beleuchtungsstärke so hohe Deutlichkeitsgrade des Sehens wie ein für stärkere Beleuchtung angepasstes. Nur bei einem bestimmten Ausmaß der Beleuchtung, welches man als das absolute Optimum der Dauerbeleuchtung bezeichnen kann, erreicht nach erfolgter Anpassung die Deutlichkeit des Sehens ihr absolutes Maximum. Für verschiedene Augen aber ist jenes absolute Optimum ein verschiedenes, weil individuelle Eigentümlichkeiten für dasselbe mitbestimmend sind. Jeder wird aus eigener Erfahrung wissen, dass es für sein Auge ein Ausmaß der Dauerbeleuchtung giebt, bei welchem er am deutlichsten sieht, die Dinge am mühelosesten unterscheidet und am meisten Einzelheiten an denselben wahrnimmt, und dass jede erheblich unter diesem Optimum zurückbleibende oder über dasselbe hinausgehende Dauerbeleuchtung die Deutlichkeit des Sehens merklich beeinträchtigt.

Die vollständige Anpassung des Auges an eine gegebene Stärke der allgemeinen Beleuchtung bedingt also, bei gleicher Schärfe des Netzhautbildes, an sich noch nicht die von dem bezüglichen Auge überhaupt erreichbare größte Deutlichkeit des Sehens, denn diese ist zugleich an die absolut optimale Beleuchtungsstärke gebunden; vielmehr ist der Zustand vollständiger Anpassung an eine gegebene Beleuchtung dadurch charakterisiert, dass das Auge dabei andauernd mit der relativ größten, ihm bei der gegebenen Beleuchtung möglichen Deutlichkeit sieht.

Würde das Auge bei einer schnelleren Änderung der Beleuchtungsstärke sofort mit der dem neuen Beleuchtungsstande entsprechenden relativ maximalen Deutlichkeit sehen, so würden wir hierin keinen Anlass finden, von einer successiven Anpassung des Auges zu sprechen; hierzu zwingt uns jedoch die Thatsache, dass das Auge nach eingetretenem Beleuchtungswechsel

eine gewisse Zeit, die Anpassungszeit braucht, ehe das relative Maximum der Deutlichkeit des Sehens erreicht wird. Es weist dies darauf hin, dass sich während dieser Anpassungszeit innere Änderungen des Auges vollziehen, durch welche dasselbe erst für die neue Beleuchtungsstärke eingerichtet wird. Wenn freilich die Zu- oder Abnahme der Beleuchtung so langsam vor sich geht, dass diese inneren, die successive Anpassung ausmachenden Änderungen mit denen der Beleuchtung gleichen Schritt zu halten vermögen, so kann es scheinen, als wäre das Auge ein ohne weiteres für sehr verschiedene Beleuchtungsstärken eingerichtetes Organ.

Wir können innerhalb gewisser Grenzen der Beleuchtungsstärke soviel Stufen der successiven Anpassung unterscheiden, wie Stufen der Beleuchtung. Der stärkeren allgemeinen Beleuchtung und der zugehörigen höheren Anpassungsstufe entspricht bis zu einer gewissen Grenze auch ein höheres Maß der Deutlichkeit des Sehens. Wächst aber die Beleuchtungsstärke über jene Grenze hinaus und vermag das Auge mit seiner Anpassung nicht weiter zu folgen, so nimmt auch die Deutlichkeit des Sehens nicht mehr zu und weiterhin sogar wieder ab.

§ 19. Gleichen Unterschieden der Lichtstärken entsprechen nicht gleiche Helligkeitsunterschiede. Es giebt eine ganze Litteratur über die Frage, nach welchem Gesetze die »Intensität der Empfindung« mit der Lichtstärke der korrelativen Stelle des Gesichtsfeldes bezw. ihres Netzhautbildes wachse. Man setzte dabei als selbstverständlich voraus, dass eine Zunahme der Lichtstärke ganz allgemein auch eine Zunahme der Helligkeit bedinge, während doch, wie bereits in § 17 gezeigt worden ist, oft genug trotz einer Zunahme der Lichtstärke ein Dunklerwerden der bezüglichen Sehfeldstelle eintritt. Man setzte zweitens voraus, dass die Helligkeit als eine Intensitätsgröße betrachtet werden könne, während sie sich doch, wie in § 10 dargelegt wurde, ebensowenig als eine Größe nehmen lässt, wie ein Ort auf einer Geraden. Nur Helligkeits- bezw. Dunkelheitsunterschiede lassen eine vergleichende Größenbestimmung und also ein angenähertes Maß zu, wie sich auch Lageverschiedenheiten zweier Orte messen lassen.

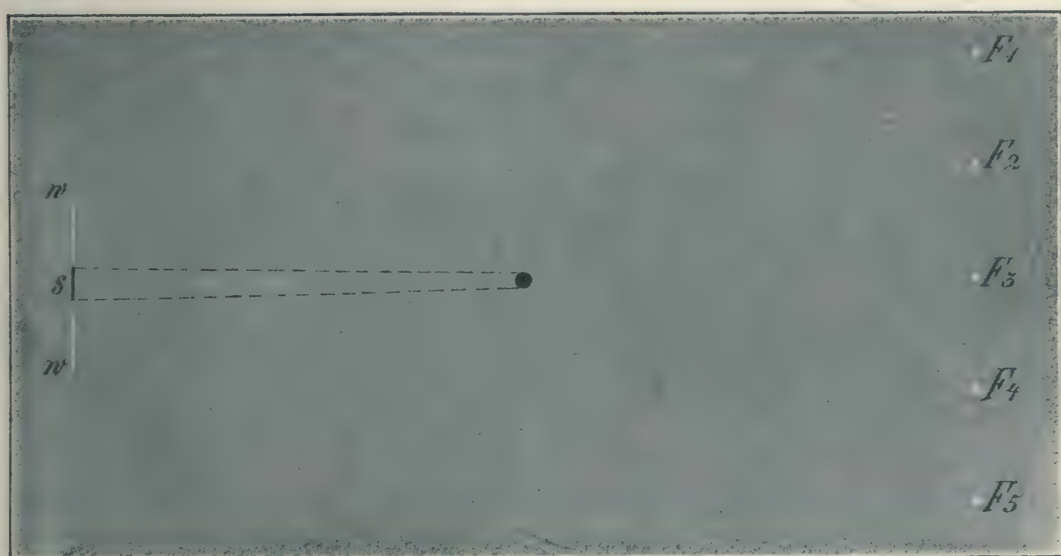
Schon diese Andeutungen genügen, ganz abgesehen von vielem anderen, was noch zur Sprache kommen wird, um darzuthun, dass die eingangs erwähnte Frage falsch gestellt ist. Wohl aber darf man fragen, nach welchen Regeln oder Gesetzen die Größe oder Deutlichkeit des Unterschiedes zweier tonfreien Farben oder, wie man hier auch sagen kann, ihr Helligkeits- oder Dunkelheitsunterschied abhängig sei von der Größe des Unterschiedes der beiden korrelativen Lichtstärken im Gesichtsfelde bezw. im Netzhautbilde.

Zunächst ließe sich denken, dass gleichgroßen Unterschieden der Licht-

stärken auch gleichgroße Unterschiede der Helligkeit entsprechen. Obgleich leicht darzuthun ist, dass diese Annahme falsch wäre, scheint es mir doch nicht überflüssig, die Mangelhaftigkeit der gewöhnlich gegen dieselbe angeführten Beweise darzulegen. Dabei sollen zunächst insbesondere solche Helligkeitsunterschiede in Betracht gezogen werden, welche für uns zwischen zwei nebeneinander und nicht bloß nacheinander gesehene Helligkeiten bestehen.

Man stelle in zunächst verfinstertem Zimmer auf einen Tisch nahe dessen Rande einen schmalen weißen Schirm (*w w*), ferner nahe dem gegenüberliegenden Rande eine Reihe von fünf oder mehr brennenden Kerzen (F_1 bis F_5) von der halben Höhe des Schirmes, und endlich zwischen

Fig. 12.



Schirm und Kerzen einen mattschwarzen vertikalen Stab auf, wie es Fig. 12 zeigt. Ob die Kerzenflammen von gleicher Lichtstärke sind oder nicht, ist hier gleichgültig. Verdeckt man alle Kerzen außer der mittleren (F_3), so sieht man auf dem weißen Schirm einen schwarzgrauen oder, wenn die Wand und alles im Zimmer befindliche schwarz ist, einen schwarzen Schatten des Stabes. Sobald man jetzt eine zweite Kerzenflamme frei macht und den Schirm mitbeleuchten lässt, verliert der Schatten sehr auffallend an Schwärze, auch wird der weiße Grund deutlich heller; aber der Farbenunterschied zwischen dem Schatten und seiner Umgebung ist jetzt bedeutend kleiner als anfangs, obwohl die Schattenstelle und ihre Umgebung einen gleichgroßen Zuwuchs an Lichtstärke erfahren haben und also die Differenz ihrer Lichtstärken die gleiche geblieben ist. Das beschriebene Verhalten wiederholt sich in schwächerem Maße, wenn man eine dritte Flamme freigiebt, in noch schwächerem, wenn auch das Licht der vierten

Flamme zugelassen wird u. s. w. Der Unterschied des Schattens von seiner Umgebung wird also dabei immer geringer. Wenn man schließlich einen Fensterladen öffnet und das volle Tageslicht auf den Schirm fallen lässt, verschwindet der Schatten gänzlich, obwohl auch jetzt noch der Unterschied zwischen der Lichtstärke des Schattenortes und seiner Umgebung derselbe ist, wie bei Beginn des Versuches, wo nur eine Flamme den Schirm beleuchtete. Durch Wiederverschluss des Fensterladens und folgeweise Ausschaltung der einzelnen Flammen lässt sich der Versuch in umgekehrter Richtung wiederholen und der wieder wachsende Unterschied des Schattens von seiner Umgebung beobachten.

Der Versuch zeigt also, dass hier bei gleichbleibendem Unterschiede der Lichtstärke zweier Teile der Schirmfläche die Farbenverschiedenheit derselben um so kleiner ist, je größer die beiden Lichtstärken sind. Jede neuhinzukommende Lichtquelle erteilt der Schattenstelle für das Auge einen größeren Helligkeitszuwuchs als der umgebenden Schirmfläche. Dementsprechend holt die in größeren Sprüngen wachsende Helligkeit der Schattenstelle die in kleineren Sprüngen wachsende der Umgebung schließlich ein, und beide werden gleich, während die Sprünge, welche dabei die Lichtstärken machten, auf der Schattenstelle stets dieselben waren wie auf deren Umgebung.

Wenn eine bei hellem Tage angezündete Straßenlaterne keine Schatten erzeugt, wenn die Sterne tagsüber auch bei klarstem Himmel unsichtbar sind, obwohl sich ihr Licht zum Lichte der »Himmelsfläche« bei Tage ebenso addiert wie während der Abend- oder Nachtdämmerung, und also der Intensitätsunterschied zwischen dem Lichte eines Sternortes und dem Lichte seiner Umgebung derselbe bleibt: so beweisen diese und analoge Thatsachen zwar ebenso wie der beschriebene Versuch, dass hier gleichgroßen Differenzen der Lichtstärken zweier Außendinge nicht auch gleichgroße Helligkeitsverschiedenheiten der bezüglichen Sehdinge entsprechen, aber alle solche Thatsachen schließen nicht ohne weiteres die Möglichkeit aus, dass letzteres doch der Fall sein würde, wenn die hier unvermeidlich gewesenen Änderungen des Anpassungszustandes der Augen ausgeschlossen wären.

Zu diesen Änderungen gehört zunächst das Pupillenspiel. Wenn z. B. der Durchmesser der Pupillen bei der Betrachtung des lichtstarken Taghimmels nur 2, bei Betrachtung des Nachthimmels aber 6 mm betrüge, und die Pupillenfläche also letzterenfalls 9 mal größer wäre als ersterenfalls, so würde bei Nacht im Netzhautbilde die Differenz zwischen den Lichtstärken eines Sternortes und seiner Umgebung 9 mal so groß sein als bei Tage, auch wenn sie am Himmel selbst, photometrisch genommen, bei Nacht nicht größer wäre als bei Tage. Denn durch die Erweiterung der Pupille wird zwar das Verhältnis der Lichtstärken zweier Teile des Netzhaut-

bildes nicht geändert, wohl aber ihre Differenz proportional mit der Zunahme der Pupillenfläche vergrößert. Einem 9mal größeren Unterschiede der Lichtstärken müsste aber nach der oben zurückgewiesenen Hypothese ein entsprechend größerer Helligkeitsunterschied entsprechen. Somit könnte ein bei kleiner Pupille untermerklicher Unterschied bei großer Pupille sehr merklich werden.

Wenn nun auch zweifellos die Unsichtbarkeit eines Sternes am Taghimmel im wesentlichen nicht darauf beruht, dass dabei die Pupille viel enger ist als bei Nacht, so zeigt doch dieser Fall besonders deutlich, wie notwendig es bei allen hier in Betracht kommenden Beobachtungen eigentlich wäre, den Einfluss der durch die veränderte Lichtstärke des Gesichtsfeldes bedingten Pupillenänderung auszuschließen. Thut man dies, indem man dicht vor das Auge ein kleines Diaphragma setzt, dessen Öffnung kleiner ist, als unter den gegebenen Umständen der Durchmesser der Pupille werden kann, so ändert sich freilich an den besprochenen Erscheinungen nichts hier wesentliches.

Viel stärker fällt, um zunächst bei den Sternen zu bleiben, folgendes ins Gewicht: Wer wie Fechner, Helmholtz und ihre Nachfolger (vgl. die Lehr- und Handbücher der Physiologie) annimmt, dass bei gleichem Reize die Stärke der »Erregung« des Auges seiner »Erregbarkeit« beiläufig proportional ist, hat zu bedenken, dass dann die Änderungen der Erregbarkeit auf die Unterschiede der Erregungsstärken einen ganz analogen Einfluss haben würden, wie die Änderungen der Pupille auf die Unterschiede der Lichtstärken im Netzhautbilde, d. h. einer z. B. 10mal größeren Erregbarkeit würden, wenn alles übrige gleichbleibt, 10mal größere Unterschiede der Erregungsstärken entsprechen. Setzen wir einmal die Erregbarkeit bei Tage = 1, die Lichtstärke der Himmelsfläche = 200 und den Zuwuchs an Lichtstärke, welcher durch einen bestimmten Stern für seinen Ort an der Himmelsfläche bedingt ist, = 1, so würden die beiden, den Lichtstärken 200 und 201 entsprechenden Erregungsstärken ebenfalls = 200 und 201, und ihr Unterschied = 1 zu setzen sein. Wäre dann die Dämmerung soweit fortgeschritten, dass die Lichtstärke der Himmelsfläche nur noch = 5, die Erregbarkeit aber unterdessen 10mal größer geworden wäre, so wäre die der Himmelsfläche entsprechende Erregung = 50, die dem Sternorte entsprechende = 60 und der Unterschied beider = 10, also 10mal größer als bei Tage. Dann wäre aber die Annahme die nächstliegende, dass dem größeren Erregungsunterschied auch ein größerer Helligkeitsunterschied entspricht, und dass die Unsichtbarkeit der Sterne bei Tage auf dem zu kleinen absoluten Unterschiede der beiden bezüglichen »Erregungen« beruht.

Es war also kein glücklicher Griff, wenn Fechner (12, I. S. 142) die Unsichtbarkeit der Sterne bei Tage als einen guten Beweis dafür anführte, dass für die Helligkeitsunterschiede im Sehfelde nicht die Unterschiede,

sondern die Verhältnisse der bezüglichen Erregungsstärken das Maßgebende seien.

Was soeben an einem extremen Beispiele erörtert wurde, gilt mehr oder minder auch von den anderen oben erwähnten Thatsachen. Denn bei allen kommt infolge veränderter Gesamtbeleuchtung eine Veränderung des Anpassungszustandes und der »Erregbarkeit« in Betracht. Je länger z. B. bei dem Versuche mit dem schattenwerfenden Stabe die Zeit zwischen dem Freigeben der einen und der nächstfolgenden Flamme ist, desto besser wird sich unterdessen das Auge für die bereits gesteigerte Beleuchtung successiv angepasst haben, so dass jede neu hinzukommende Flamme das Auge in einem anderen Anpassungszustande findet, als die vorhergehende. Sind die Zwischenzeiten zu kurz, als dass solche Successivanpassung wesentlich in Betracht kommen kann, so wird doch die allgemeine Steigerung der Beleuchtung, wie sie durch jede neue Kerzenflamme bedingt ist, von der entsprechenden simultanen, auf Wechselwirkung der Sehfeldstellen beruhenden Anpassung begleitet sein und die Lichtempfindlichkeit dadurch sofort weiter herabgesetzt werden.

Gleichviel wie man sich diese thatsächlich eintretenden Änderungen der Lichtempfindlichkeit erklären will, es bleibt sicher, dass, wer die Art der Abhängigkeit der Helligkeitsunterschiede von denen der Lichtstärke untersuchen will, in erster Linie, soweit irgend möglich, dafür zu sorgen hat, dass das Sinnesorgan, dessen Reaktionen auf die verschiedenen Lichtstärken zu vergleichen sind, sich nicht in der Zeit von einer Reaktion zur anderen irgend wesentlich verändert hat, sondern dass sämtliche zur Anwendung kommenden Lichtstärken das Organ in demselben Zustande treffen. Thut er dies nicht, so gleicht er einem Manne, welcher Messungen mit einem Thermometer machen will, dessen lockere Skala sich gegen die Quecksilbersäule in nicht kontrollierter oder gar nicht kontrollierbarer Weise in der Zeit von einer Ablesung zur anderen verschiebt.

Alle Beobachtungen also, bei denen sich die Gesamtbeleuchtung in der Zeit von einer Beobachtung zur anderen geändert hat, sind zur Entscheidung der hier besprochenen Frage nicht einwandsfrei bezw. gar nicht verwendbar. Bei den folgenden Beobachtungen oder Versuchen sind nun die eben erwähnten Einwendungen ausgeschlossen.

Hinter der Flamme eines Bunsenbrenners befinde sich ein zur rechten Hälfte weißer, zur linken Hälfte schwarzer Kartonstreifen: sobald man nach der Flamme blickt, sieht man dieselbe, soweit sie vor dem schwarzen Grunde erscheint, hell, während sie vor dem weißen Grunde kaum oder gar nicht sichtbar ist.

Hinter die große Flamme einer Spiritus-Dochtlampe bringe man ein

steifes weißes oder graues Papier, auf welches ein schmales Stück belegten Spiegelglases geklebt ist; die Ebene des Papieres mit dem Spiegel sei so gewählt, dass sich in letzterem für das Auge des Beobachters ein Stück des gleichmäßig hellen Himmels spiegelt: soweit die Flamme vor dem Spiegel liegt, ist sie unsichtbar, vor dem grauen oder weißen Papier aber erscheint sie leuchtend.

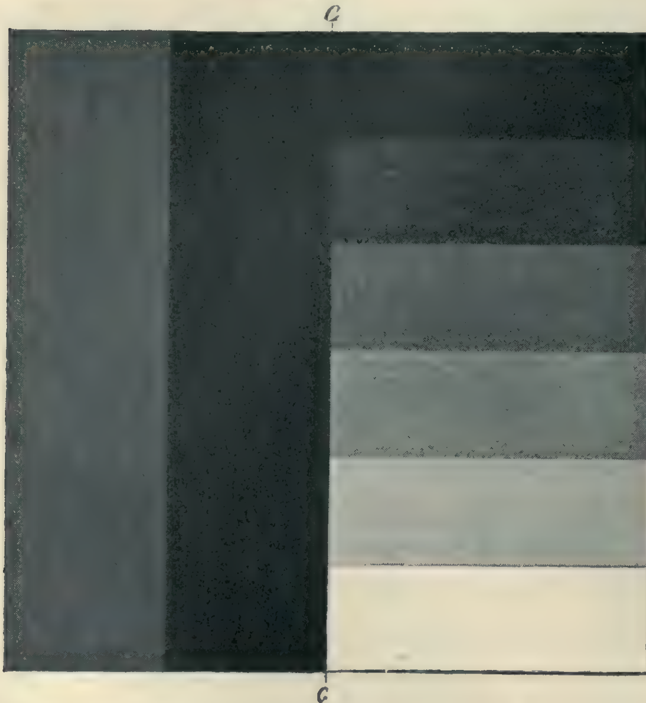
Hätte man vollends bei diesen Versuchen vor jeder Beobachtung zwischen sich und die Flamme einen geichmäßig grauen Schirm zureichend lange gehalten und die Augen schon vor der Entfernung des Schirmes passend gerichtet, so würden selbst für einen peinlichen Kritiker die oben erhobenen Bedenken beseitigt sein.

Eine kleine möglichst dünne unbelegte Spiegelglasplatte (z. B. ein geschliffenes Deckglas) sei so gegen ein Fenster geneigt, dass sich in ihr für den Beobachter ein Teil der gleichmäßig hellen Himmelsfläche spiegelt, wenn er auf ein hinter bezw. unter dem Glase in passender Entfernung befindliches und zureichend beleuchtetes bedrucktes Blatt blickt. Auf dem Teile des Blattes, wo sich das gespiegelte Himmelslicht zu dem von dem Papier und seinen Buchstaben kommenden Lichte addiert, sieht der Beobachter die Buchstaben weniger von dem weißen Grunde abstechen, sie sind ihm minder deutlich, und wenn die Schrift zureichend klein bezw. das zugespiegelte Licht zureichend stark ist, gar nicht mehr lesbar. Da wie gesagt bei gleicher Schärfe des Netzhautbildes sowie gleicher Form und Größe der Buchstaben die Deutlichkeit einer Schrift lediglich von der Größe des Unterschiedes der Farbe abhängt, in welcher einerseits die Buchstaben, andererseits deren Umgebung erscheinen, so haben wir in der größeren oder geringeren Deutlichkeit der Schrift zugleich ein Merkmal für den größeren oder kleineren Betrag dieses Unterschiedes.

Die Methode der Lichtzuspiegelung eignet sich überhaupt ganz vorzüglich zur Untersuchung der Beziehungen zwischen den Intensitätsverschiedenheiten des Lichtes und den korrelativen Helligkeitsunterschieden im Sehfelde. Lässt man einen weißen Papierschirm sich an einer unbelegten Spiegelglasplatte spiegeln, so kann man durch Verstärkung oder Abschwächung der den Schirm beleuchtenden Lichtquelle oder durch Änderung des Winkels, welchen die Schirmfläche mit der Einfallsrichtung des sie treffenden Himmelslichtes bildet, die Mengen des dem Auge zugespiegelten Lichtes in fein abgestufter Weise abändern; andererseits kann man durch passende Einrichtungen ganz unabhängig von der Menge des zugespiegelten Lichtes die Beleuchtung der durch die Glasplatte beobachteten Schrift, Photographie, oder was sonst benutzt wird, verstärken oder abschwächen. Dass man beim Blicken durch die Glasplatte eigentlich zwei, ein wenig gegeneinander verschobene Bilder der gespiegelten Fläche erhält, ist für die meisten hier in Betracht kommenden Versuche ganz unwesentlich.

Man überklebe die eine Hälfte einer Glastafel mit einer Skala tonfreier Papiere, die andere Hälfte teils mit tiefschwarzem, teils mit unmittelbar angrenzendem schwarzgrauen Papier in der Weise, wie es Fig. 13 zeigt, und stelle auf die Grenzlinie (GG) der beiden Hälften ein vertikales unbelegtes Spiegelglas von der Größe der ersterwähnten Glastafel. Blickt man dann durch das Spiegelglas auf die Skala, so sieht man im allgemeinen den von dem Spiegelglase entfernteren Teil der Skala, auf welchen das Spiegelbild des schwarzgrauen Papieres fällt, heller als den dem Spiegelglase näheren Teil, und der Helligkeitsunterschied beider Teile einer Stufe ist um so deutlicher (größer), je lichtschwächer die bezügliche Stufe ist. Bei gleichbleibendem Standort des Körpers vor dem Apparate sind diese Helligkeitsunterschiede um so größer, je höher sich die Augen über der Ebene der Skala befinden, und wenn man den immer aufrecht gehaltenen Kopf durch zunehmende Kniebeugung abwärts bewegt, so werden die Helligkeitsunterschiede immer kleiner und zuerst auf der lichtstärksten Stufe der Skala, dann auf der nächst unteren u. s. f. unmerklich, obwohl der Lichtstärkenunterschied auf allen Stufen der Skala derselbe ist, von einem kleinen hier nicht in Betracht kommenden Fehler abgesehen.

Fig. 13.



Will man diesen kleinen Fehler vermeiden und zugleich in strengster Weise für immer gleichen Anpassungszustand der Augen sorgen, so befestigt man die Spiegelglasplatte an einem Träger derart, dass ihr unterer Rand das Papier nicht berührt, sondern einige Millimeter über demselben liegt. Sodann schiebt man zwei ganz gleiche, große und steife graue Blätter von links und rechts her über die Papierfläche, bis ihre parallelen Ränder in dem Punkte zusammentreffen, auf den man bei der nachher anzustellenden Beobachtung den Blick richten will. Nachdem man dann längere Zeit hindurch die graue Fläche der Blätter zwanglos betrachtet hat, fixiert man jenen Punkt und zieht sofort die beiden Blätter mit mäßiger Geschwindigkeit nach rechts und links zur Seite. Dann ist man sicher, dass die Netzhautstelle, mit der man beobachtet, vor jeder Einzelbeobachtung immer wieder unter derselben Lichtwirkung gestanden hat. Durch quere Verschiebung der unteren Glasplatte lässt sich dann auch vor jeder Einzel-

beobachtung bei unveränderter Kopflage eine andere Stufe der Skala an denselben Beobachtungsort bringen.

Wo immer ein Spiegelbild auf einer teils lichtschwächeren, teils lichtstärkeren Fläche gesehen wird, tritt es auf der ersteren deutlicher hervor als auf der letzteren, auch wenn die durch das Spiegelbild bedingten Lichtzuwüchse auf beiden Teilen der Fläche ganz gleich groß sind. Jede Spiegelglasscheibe eines Schaufensters, jeder Flügel eines nach innen geöffneten Fensters giebt Gelegenheit dies zu bestätigen.

Das Ergebnis aller derartigen Versuche ist also, dass auch bei unverändertem Anpassungszustande des Auges gleichen Unterschieden der Lichtstärken nicht auch gleich deutliche Helligkeitsunterschiede entsprechen, sondern dass die letzteren um so weniger auffällig sind, je größer bei gleichbleibenden Unterschieden die Lichtstärken sind.

Neuerdings hat Petrén auf Grund einer sorgfältigen, mit Sv. Johansson ausgeführten Untersuchung angegeben (17, S. 86), »dass die Größe des eben merklichen Unterschiedes bei derjenigen Intensität der Reize, welche ein weißes, von diffusem Tageslichte voll beleuchtetes Papier besitzt, etwa dieselbe ist, wie bei einer 33 mal geringeren Intensität«. Es muss besonders hervorgehoben werden, dass bei dieser Untersuchung dafür gesorgt war, das Auge vor jeder Einzelbeobachtung wieder möglichst genau in denselben Anpassungszustand zu bringen. Hätte das angegebene, in durchaus zuverlässiger Weise, aber unter besonderen, ungewöhnlichen Umständen gewonnene Ergebnis eine allgemeine Gültigkeit, so müsste z. B. bei dem soeben besprochenen Spiegelungsversuch der durch das zugespiegelte Licht erzeugte Helligkeitsunterschied auf den lichtschwächsten Stufen der Skala ebenso deutlich sein, wie auf den lichtstärksten, und auch auf beiden gleichzeitig eben merklich bezw. eben unmerklich werden, was jedoch nicht entfernt der Fall ist. Petrén und Johansson vermehrten oder verminderten auf einer sehr kleinen runden Stelle (von nur 50′ Gesichtswinkel) einer großen gleichmäßig grauen Fläche ganz plötzlich und nur für $^1/_3$ Sekunde die Lichtstärke und zwar auf der einen Hälfte der Stelle stärker als auf der anderen, so dass also die Lichtstärken beider Hälften verschieden wurden. Der kleinste dabei noch merkliche Unterschied dieser beiden Lichtstärken wurde bestimmt. Sie fanden ihn beiläufig ebenso groß, wenn die Lichtstärken der beiden etwas verschiedenen Hälften des kleinen Kreisfeldes der Lichtstärke eines weißen Papieres ganz nahe kamen, wie wenn sie 33 mal geringer waren und also der eines schwarz erscheinenden Papieres beiläufig entsprachen. Wie dieses Ergebnis aus den besonderen Versuchsbedingungen zu erklären ist, wird sich weiterhin herausstellen.

§ 20. Entsprechen gleichen Verhältnissen der Lichtstärken der wirklichen Dinge gleichgroße Helligkeitsunterschiede der Sehdinge? Eine zweite naheliegende Hypothese über die Beziehungen zwischen den Unterschieden der Lichtstärken und den Unterschieden der korrelativen Farben (Helligkeiten) ist die, dass gleichgroßem Unterschiede der letzteren dasselbe Verhältnis der Lichtstärken entspreche. Nahe

liegend ist diese Annahme, weil bei Änderungen der allgemeinen Beleuchtung zwar die Unterschiede der Lichtstärken der Einzelteile des Gesichtsfeldes sich proportional der Zu- oder Abnahme der Beleuchtungsstärke ändern, die Verhältnisse der Lichtstärken aber dieselben bleiben, und man es zweckmäßig finden kann, wenn auf diese Weise die Deutlichkeit des Sehens, wenigstens innerhalb weiter Grenzen, von den Intensitätsänderungen der allgemeinen Beleuchtung unabhängig gemacht wäre.

Fechner war der Ansicht, dass dieser Hypothese, abgesehen von minimalen oder übermäßig großen Lichtstärken allgemeine Gültigkeit zukomme. Die in § 17 besprochenen Thatsachen haben uns jedoch schon gezeigt, wie mit der Gesamtbeleuchtung des Gesichtsfeldes die Deutlichkeit des Sehens zu- und abnehmen kann, und dass also hierbei demselben Verhältnis je zweier Lichtstärken nicht immer derselbe Unterschied der beiden korrelativen Helligkeiten entspricht. Wir haben ferner in § 18 erfahren, welch großen Einfluss der jeweilige Anpassungszustand des Auges auf die Deutlichkeit des Sehens hat. Demnach ist jetzt zu prüfen, inwieweit die erwähnte Annahme für den Fall unveränderter Beleuchtung des Gesichtsfeldes und bei unverändertem Anpassungszustande des Auges Geltung hat.

Haben wir ein Gesichtsfeld mit konstanter Beleuchtung vor uns und lassen innerhalb eines engeren Bezirkes unseren Blick umherwandern, so bleibt (abgesehen von ganz besonderen Fällen) der allgemeine Anpassungszustand des Auges unverändert. Wenn also dabei die zu vergleichenden Helligkeitsunterschiede bezw. Lichtstärkenpaare gleichzeitig in einem solchen Bezirke gegeben sind und wir unseren Blick abwechselnd bald dem einen, bald dem anderen Paare zuwenden, so ist der Forderung einer unveränderten Beleuchtung des Gesichtsfeldes und eines gleichbleibenden allgemeinen Anpassungszustandes des Gesamtauges genügt. Dann lässt sich nur noch verlangen, dass auch der besondere somatische Sehfeldbezirk, mit welchem man beobachtet, sich vor jeder Einzelbeobachtung wieder genau in demselben Zustande befinde. Man erreicht auch dies, wenn man zureichende Pausen zwischen die einzelnen Beobachtungen einschiebt und während der Pausen den Blick auf einer ganz gleichartigen, vorübergehend vor das Beobachtungsfeld gebrachten Fläche von passender Lichtstärke ruhen lässt (vgl. § 26).

Schon in § 11 (S. 39) wurde erwähnt, dass zuerst Plateau versucht hat, eine Stufenreihe tonfreier Pigmentfarben herzustellen, in welcher je zwei Nachbarstufen beiläufig gleich stark voneinander abstachen und also gleichgroßen Helligkeitsunterschied zeigten. Ähnliche Versuche hat später Ebbinghaus (10, S. 1006) mit besonderer Sorgfalt angestellt und zugleich die Verhältnisse der Lichtstärken bestimmt, welche zwischen je zwei Nachbarstufen seiner achtstufigen Reihe bestanden. Die verschieden pigmentierten

Papiere[1]) kamen als Scheiben von 2 cm Durchmesser auf einem möglichst lichtschwachen Grunde und »bei diffuser Tagesbeleuchtung« zur Anwendung. Die lichtstärkste Scheibe war, wie er angiebt, beiläufig 100 mal lichtstärker als die lichtschwächste[2]). Als Quotienten der beiden Lichtstärken je zweier Nachbarstufen der Reihe ergaben sich, von der lichtschwächsten bis zur lichtstärksten fortschreitend, folgende: 2.25; 2.11; 2.05; 1.77; 1.72; 1.68; 1.98.

Wüsste man, zwischen welchen Grenzen die Verhältnisse der Lichtstärken innerhalb der Reihe sich hätten abändern lassen, ohne dass der Eindruck der Gleichwertigkeit der sieben Helligkeitsunterschiede verloren gegangen wäre, so würde der Wert obiger Versuchsergebnisse noch wesentlich größer sein. Aber auch ohne dies darf man aus denselben schließen, dass unter den gegebenen Bedingungen gleichen Helligkeitsunterschieden mit viel größerer Annäherung gleiche Verhältnisse der Lichtstärken entsprachen als gleiche Unterschiede derselben.

Denselben Schluss durfte man aus den Versuchsreihen Delboeuf's (8) und den sehr sorgfältigen Versuchen von Lehmann und Neiglick (9) ziehen, bei welchen es galt, zwischen zwei gegebenen mehr oder minder stark verschiedenen Helligkeiten die mittle Helligkeit herzustellen und zugleich die Verhältnisse zwischen den drei bezüglichen Lichtstärken zu bestimmen. Die solcher mittlen Helligkeit entsprechende Lichtstärke lag stets der mittlen Proportionalen der beiden anderen Lichtstärken näher als dem arithmetischen Mittel derselben, obwohl die Versuchsbedingungen sehr verschiedene waren.

Schon Fechner hatte die von den Astronomen ganz unabhängig von jeder Messung der Lichtstärken aufgestellte Reihe der Sterngrößen als eine Skala äquidifferenter Helligkeiten angenommen und aus den späteren photometrischen Bestimmungen der Lichtstärken der einzelnen Sterngrößen abzuleiten versucht, dass zwischen je zwei Nachbarstufen in der Skala der Sterngrößen immer wieder dasselbe Verhältnis der Lichtstärken bestehe. Leider aber lässt sich bei der Schätzung der Sterngrößen der Einfluss des Raumsinns nicht sicher ausschließen, wie dies schon in § 11 erörtert wurde.

Allen diesen Thatsachen stehen jedoch andere gegenüber, aus denen ein gewaltiger Einfluss der absoluten Größe eines Lichtstärkenpaares auf die Deutlichkeit seines Helligkeitsunterschiedes hervorgeht, und zwar bei unveränderter Pupille und gleichem Stande der successiven Adaptation.

---

1) Nach einigen Proben zu urteilen, welche ich der Güte des Herrn Kollegen Ebbinghaus verdanke, waren diese Papiere von einer kaum zu übertreffenden Vollkommenheit. Dagegen ließen die auf meine Veranlassung fabrikmäßig hergestellten Serien grauer Papiere leider viel zu wünschen übrig. Zu besonderen Zwecken musste ich Helligkeitsskalen auf photographischem Wege herstellen lassen.

2) Das Remissionsvermögen des schwärzesten Papieres, welches mir zur Verfügung stand, verhielt sich zu dem des weißesten nur wie 1 : 72.

In besonders auffallender Weise zeigen dies folgende Beobachtungen, welche den Helligkeitsunterschied zwischen einer »weißen« Papierfläche und einer darauf befindlichen »schwarzen« Schrift oder Zeichnung betreffen. Das Verhältnis der beiden hier in Betracht kommenden Lichtstärken, des Papieres einerseits und der Buchstaben andererseits, durfte, wie in § 6, S. 14 erwähnt wurde, beiläufig gleich 15 : 1 geschätzt werden. Jedenfalls bleibt das Verhältnis bei allen Beleuchtungsstärken der Papierfläche dasselbe, sofern der weiße Grund und die »schwarzen« Buchstaben oder Striche gleich matt sind. Es müsste deshalb, wenn ihre Helligkeitsunterschiede lediglich vom Verhältnis ihrer Lichtstärken abhingen, auch die Deutlichkeit der Buchstaben oder Striche wenigstens innerhalb weiter Grenzen der Beleuchtungsstärke dieselbe bleiben. Dies ist jedoch keineswegs der Fall.

Wenn man ein kleines fein schraffiertes oder mit Perlschrift bedrucktes Blatt in der Mitte knickt und so vor sich hält, dass die eine Hälfte einem Fenster zugekehrt ist, dann ist diese Hälfte lichtstärker als die andere, und man kann das Verhältnis der Lichtstärken beider Hälften innerhalb weiter Grenzen abändern, je nachdem man den Knickungswinkel größer oder kleiner wählt, oder bei gleichem Winkel die Lage der Flächen zur Einfallsrichtung des Lichtes ändert, oder sich mit dem Blatte vom Fenster entfernt bezw. demselben nähert. Vergleicht man nach Befestigung des Papieres in der gewählten Lage die eine Hälfte der Schrift mit der anderen, so bemerkt man bei irgend erheblicher Differenz der Lichtstärken beider Hälften, dass die auf der lichtstärkeren sichtbare Schraffierung auf der lichtschwächeren unsichtbar ist, bezw. dass, wenn die Perlschrift auf der ersteren eben noch lesbar ist, dies auf der anderen Hälfte nicht mehr der Fall ist. Analoges beobachtet man, wenn man die eine Hälfte des nicht geknickten Blattes auf irgend eine Weise beschattet.

Noch besser ist es, einen schmalen Streifen des bedruckten oder fein schraffierten hinreichend steifen und nicht glänzenden Blattes über das lichtfreie Loch eines Dunkelkastens (vgl. § 16, S. 65) zu brücken und durch ein dazu geeignetes Polariphotometer zu betrachten. Die getrennt nebeneinander erscheinenden Bilder, welche man dabei von dem einfachen Objekte erhalten kann, bieten den Vorteil, dass sie abgesehen von der verschiedenen Lichtstärke ganz identisch sind, daher man korrespondierende Stellen derselben in bezug auf die Deutlichkeit der Schrift oder der Schraffierung miteinander vergleichen kann. Zu diesen Beobachtungen musste ich jedoch ein Polariphotometer benutzen, in welchem das doppelte Bild nicht wie in dem früher beschriebenen (§ 16, S. 67) durch ein doppeltbrechendes Prisma, sondern durch einen großen Kalkspat (von nahezu 75 mm Länge und 40 mm Seitenlänge seiner Endflächen) erzeugt wurde; denn das doppeltbrechende Prisma gab nicht zwei bei gleicher Lichtstärke gleichscharfe Bilder.

War der Streifen in der Nähe des Fensters von dem hellen weißlichen Himmel beleuchtet, so sah ich eine äußerst feine Schraffierung auf dem helleren Bilde noch deutlich, auf dem dunkleren aber nicht mehr, wenn der Nicol auf 30° stand, was einem Verhältnis der Lichtstärken beider Bilder gleich $^1/_3$ entspricht. Aber auch bei einem Verhältnis gleich $^1/_2$ gelang es mir günstigenfalls noch, feinste Einzelheiten des lichtstärkeren Bildes zu sehen, die im lichtschwächeren unkenntlich waren. Eine sichere Grenze lässt sich hier, wie bei solchen Grenzfällen überhaupt, nicht angeben.

Beleuchtet man eine kleine Stelle einer schon gut beleuchteten feineren Druckschrift oder dergl. mit Hilfe eines kleinen Spiegelchens noch stärker oder wirft man auf die Stelle mittels einer Konvexlinse den Zerstreuungskreis einer kleinen Lichtquelle und entfernt dann das Auge so weit, dass die Schrift trotz bester Akkommodation im allgemeinen eben unleserlich wird, so ist sie auf der stärker beleuchteten Stelle noch lesbar.

Absolut größeren Lichtstärken entsprach also bei diesen Versuchen, trotz ganz gleich bleibendem Verhältnis derselben sowie gleicher Pupillenweite und gleicher Gesamtanpassung des Auges, eine größere Deutlichkeit der Helligkeitsunterschiede; im letzterwähnten Falle sogar schon dann, wenn die Lichtstärken im einen Bilde nur dreimal bezw. sogar nur doppelt so groß waren, als im anderen.

Analoge Ergebnisse erhält man an Diapositiven, welche ein sehr feines Detail zeigen. Hält man ein solches Diapositiv in passendem Abstande vor eine gut beleuchtete halb weiße halb graue Fläche von z. B. $^1/_5$ der Lichtstärke der weißen, oder bringt man dicht unter die eine Hälfte ein dunkelgraues, unter die andere ein hellgraues oder ganz ungefärbtes Glas und hält das Ganze vor eine gleichmäßig weiße Fläche, so erkennt man auf der heller erscheinenden Hälfte des Diapositivs noch feinere Einzelheiten als auf der anderen Hälfte. Um einen sicheren Vergleich zu haben, sucht man sich eine bestimmte besonders geeignete Stelle des Bildes aus und schiebt dieselbe bei der einen Beobachtung vor den weißen, bei der nächsten vor den grauen Hintergrund, bezw. schiebt man bald das dunklere, bald das hellere Glas unter die Stelle, während jetzt der Hintergrund ganz gleichmäßig weiß ist.

Um bei allen solchen Versuchen ganz streng der Forderung zu genügen, dass das Auge unmittelbar vor jeder Beobachtung sich wieder in demselben Anpassungszustande befinde, kann man das Sehobjekt zwischen je zwei Einzelbeobachtungen immer wieder durch graue Schirme verdecken, auf welchen der Blick während der zureichend langen Pausen der Beobachtung zwanglos zu ruhen hat. Dass die Gesamtbeleuchtung während einer Beobachtungreihe dieselbe bleiben soll, bedarf kaum wieder der Erwähnung.

Fechner giebt (12, I. T. S. 140) an, dass ihm »benachbarte Wolkennuancen, die nur einen spurweisen Unterschied für das Auge darbieten«, durch graue Gläser, die nur $^1/_7$ des Lichtes durchließen, »mindestens noch ebenso merklich waren, als bei freiem Auge«. Derartige Versuche sind seitdem öfters angestellt worden, teils mit analogem, teils mit abweichendem Ergebnis (z. B. von Helmholtz). Für unseren Zweck sind sie unbrauchbar, weil dabei die Gesamtbeleuchtung der Netzhaut bedeutend verändert wird. Fechner bemerkt selbst (12, I. T. S. 144), dass er »bei Vornahme oder Wegnahme der Gläser ein momentanes Undeutlicherwerden des Unterschiedes erfuhr, was jedoch beidesfalls schnell vorüberging«. Die Zeit, welche nach jedem Beleuchtungswechsel verfließen musste, ehe Fechner den fraglichen Unterschied wieder bemerkte, war eben diejenige, welche das Auge brauchte, um sich der neuen Beleuchtung wieder zureichend anzupassen.

Dabei will ich bemerken, dass mir die Helligkeitsunterschiede auf sehr lichtstarken weißen Wolken beim Sehen durch ein passendes graues, dicht vor das Auge gehaltenes Glas deutlicher sein können als bei freiem Auge. Die optimale Beleuchtungsstärke des Gesichtsfeldes (s. § 18) ist letzterenfalls für mich bereits überschritten. Man muss bedenken, dass schon eine »graue« Wolke sehr viel lichtstärker ist als gleichzeitig ein in der Nähe des Fensters befindliches »weißes« Papier.

Viel besser, doch auch nur in begrenzter Weise, stimmen die folgenden Beobachtungen zu der hier geprüften Hypothese.

Es ist schon vielfach untersucht worden, inwieweit einem nur ebenmerklichen Unterschiede zweier tonfreier Farben oder Helligkeiten ein konstantes Verhältnis der beiden korrelativen Lichtstärken entspricht. Da jedoch bei diesen Versuchen nicht dafür gesorgt war, dass der Anpassungszustand unmittelbar vor jeder Einzelbeobachtung immer wieder derselbe und die Gesamtbeleuchtung des Auges während der ganzen Beobachtungsreihe unverändert war[1]), so sind die Ergebnisse dieser Versuche für die uns hier beschäftigende Frage nicht ohne weiteres verwertbar. Die folgenden Versuche aber genügen der soeben gestellten Forderung und unterscheiden sich von jenen älteren insbesondere dadurch, dass die benutzten Lichtstärkenpaare nicht nacheinander, sondern nebeneinander im Gesichtsfelde gegeben sind. Dies gestattet eine viel raschere und bequemere Übersicht über die beiläufigen Grenzen, innerhalb deren bei der gewählten Beleuchtung der Objekte gleichen Verhältnissen ihrer Lichtstärken gleich merkliche Helligkeitsverschiedenheiten im Sehfelde entsprechen.

Eine 4 cm breite und 18 cm lange Glasplatte trägt auf ihrem mittlen Teile eine z. B. sechsstufige Skala tonfreier Farben, bestehend aus ganz matten 15 mm breiten Papierstreifen, einem schwarzen (Kreiselwert 6) am einen, einem weißen (Kreiselwert 360) am anderen Ende und dazwischen vier nach ihrer Lichtstärke passend abgestuften grauen. Die Glasplatte ist an beiden Seiten scharf abgeschliffen und ebenso scharf sind die Papier-

1) Eine Ausnahme machen die oben (S. 81) erwähnten Versuche von Petrén.

streifen seitlich abgeschnitten, was für den Versuch von besonderer Wichtigkeit ist.

Diese möglichst gut vom Himmelslicht beleuchtete Skala wird über das Dunkelloch eines großen Dunkelkastens gebrückt und durch das mit seiner Mitte stets senkrecht über die Beobachtungsstelle gebrachte Polariphotometer betrachtet. Dieses ist zur Skala so orientiert, dass das extraordinäre Bild derselben in rechtwinklig zum Längsrande der Skala gehender Richtung verschoben erscheint und zwar z. B. um die Hälfte der Skalenbreite. Hierbei decken sich also die beiden Bilder zur Hälfte und man sieht drei Skalen von halber Breite, eine mittlere hellste und zwei seitliche minder helle. Die mittlere hat dieselbe Lichtstärke für das Auge, wie sie die bei Nullstellung des Nicol einfach gesehene Skala hat. Die Lichtstärken aller einzelnen Stufen einer seitlichen Skala haben zu den Lichtstärken der ihnen entsprechenden Stufen der mittleren Skala dasselbe Verhältnis.

Wäre es nun richtig, dass der Helligkeitsunterschied je zweier Farben, bei gleichem Verhältnis der korrelativen Lichtstärken innerhalb weiter Grenzen unabhängig von der absoluten Größe dieser Lichtstärken ist, so müsste der Helligkeitsunterschied zwischen je einer Stufe der mittlen Skala und der entsprechenden unmittelbar angrenzenden Stufe einer seitlichen Skala überall gleich groß sein. Solange diese Unterschiede noch leicht merklich sind, lässt sich meist nur sagen, dass sie auf den dunkelsten Stufen minder auffallend sind, als auf den übrigen. Bringe ich aber zwischen je zwei Beobachtungen den Nicol seiner Nullstellung immer näher, so wird auf der einen Seite der Unterschied zuerst auf der dunkelsten und dann auch auf der nächstfolgenden Stufe ($^1/_{20}$ der Lichtstärke des Weiß), zuweilen auch noch auf der zweitfolgenden ($^1/_9$ der Lichtstärke des Weiß) unbemerkbar, während er auf den übrigen noch merklich ist. Für die letzteren wage ich auf Grund meiner mehr beiläufig angestellten Beobachtungen vorerst nicht zu sagen, ob der Unterschied auf allen gleichzeitig untermerklich wird oder vielleicht auf der letzten weißen Stufe etwas eher als auf einer minder hellen. Auf einer siebenstufigen, photographisch hergestellten Skala, deren Endweiß nur 15mal lichtstärker war, als ihr Endschwarz, verschwand auf den 5 helleren Stufen der Unterschied gleichzeitig, nur auf den zwei dunkelsten etwas früher.

Ein analoges Ergebnis liefert folgender Versuch. Eine beiläufig 6 cm breite Skala tonfreier, 15 mm breiter Papierstreifen ist auf eine kleine, die Skala oben und unten überragende Holzplatte geklebt, aus deren Längsmittelteil ein daumenbreiter Streifen (von der Länge der Skala) ausgeschnitten ist. Über diese Längslücke laufen die Papierstreifen frei und ganz eben hinweg und jeder hat in seiner Mitte ein haarscharf ausgeschlagenes Loch von 2 mm oder 4 mm Durchmesser. Die Löcher sind fast absolut lichtlos, wenn die Skala über der Öffnung eines tiefen Dunkelkastens (s. § 16, S. 65)

liegt. Durch das über der Skala befindliche Polariphotometer betrachtet erscheinen die beiden Bilder der Skala genau rechtwinklig zum Rande der Skala gegeneinander verschoben und decken sich zum größeren Teile. Man sieht also eine breite hellere Skala zwischen zwei schmäleren lichtschwächeren, welche letzteren für das Folgende nicht weiter in Betracht kommen. Auf jeder Stufe der ersteren erscheinen, als doppeltes Bild des bezüglichen Loches, zwei kleine runde dunkle Flecke. Ist der Nicol auf 45° eingestellt, so hat jedes der beiden Lochbilder die halbe Lichtstärke seiner Umgebung, dreht man ihn aus dieser Lage zurück, so wird die Lichtstärke des einen Lochbildes vermehrt, die des anderen vermindert. Bei einer gewissen Annäherung an die Nullstellung sieht man bereits, dass die Lochbilder der einen Reihe auf den dunkelsten Stufen der Mittelskala minder deutlich sind, als auf den übrigen, obwohl das Verhältnis zwischen der Lichtstärke eines Lochbildes zur Lichtstärke seiner Umgebung auf allen Stufen der Skala dasselbe ist. Bei weiterer Annäherung an die Nullstellung verschwand stets zuerst das bezügliche Lochbild auf der dunkelsten Stufe, sodann auch das auf der nächsten Stufe ($^1/_{33}$ der Lichtstärke des Weiß), während die übrigen noch merklich blieben. Von letzteren gilt wieder das beim vorigen Versuche Gesagte.

Fig. 14.



Ganz ähnliche Ergebnisse erhielt ich nach folgender Methode. Eine von tiefem Schwarz (Kreiselwert 6) bis zum besten Weiß (Kreiselwert 360) gehende, wieder sechsstufige Skala tonfreier Papiere ist auf einer Glasplatte tadellos aufgeklebt. Vor dieser vertikal stehenden und in vertikaler Richtung verschiebbaren Skala steht in passendem Abstande ein vertikaler mattschwarzer Stab aus Holz oder Metall, dessen Länge und Dicke sich nach den Dimensionen der Skala zu richten hat. Eine sehr schmale, ebenfalls lotrechte Lichtquelle erzeugt auf der, von einer zweiten viel stärkeren Lichtquelle gleichmäßig beleuchteten Skala einen durch alle Stufen derselben verlaufenden schmalen Schatten (vgl. Fig. 14)[1]. Durch Verkürzung oder Verlängerung der schmalen Lichtquelle kann die Deutlichkeit des Schattens gemindert oder gemehrt werden. Hat man auf diese Weise den Schatten auf irgend einer Stufe der Skala eben merklich gemacht, so kann man zugleich

[1] Die Figur 14 ist zwar auf photographischem Wege hergestellt, kann aber, wie kaum gesagt zu werden braucht, die Verhältnisse der Lichtstärken des Originals nicht genau wiedergeben und soll nur zur Erläuterung der Methode dienen.

feststellen, ob und inwieweit er auf den anderen Stufen sichtbar ist. Das Verhältnis der Lichtstärke der Schattenstelle zur Lichtstärke ihrer Umgebung ist bei sorgfältiger Einrichtung des Versuchs auf allen Stufen der Skala dasselbe, aber die absoluten Lichtstärken sind auf jeder Stufe andere. Um sicher zu sein, dass der Teil der Skala, auf welchem man den Schatten eben sieht oder sucht, stets in genau derselben Weise beleuchtet wird, kann man die einzelnen Stufen durch vertikale Verschiebung der Skala immer an genau denselben Ort bringen. Ist die schmale Lichtquelle in allen ihren Teilen gleich lichtstark und der Skala zureichend fern, so ist diese Vorsichtsmaßregel überflüssig. Als die kleinere Lichtquelle diente mir entweder ein mit Mattglas gedeckter schmaler Spalt in einem Fensterladen, der sich durch einen Schieber beliebig verkürzen ließ, oder ein im elektrischen Strome glühender vertikaler Platindraht, von welchem eine beliebig lange Strecke durch ein vertikal verschiebbares Schirmchen abgeblendet werden konnte. Als die starke Lichtquelle diente das durch ein bzw. zwei Fenster in das weißgetünchte Zimmer fallende Himmelslicht.

Auch hier war der Schatten, wenn er infolge zunehmender Verkleinerung der kleinen Lichtquelle bereits überall nur wenig von seiner Umgebung abstach, auf den schwarzen und schwarzgrauen Stufen der Skala entschieden minder deutlich als auf den übrigen, und verschwand auf jenen bereits, wenn er auf den übrigen noch schwach merklich war.

Um einige denkbare Fehlerquellen auszuschließen, habe ich die Skala auch horizontal gestellt, so dass der Schatten stets nur auf eine Stufe der Skala fiel und durch Horizontalverschiebung der letzteren auf jede beliebige Stufe gebracht werden konnte, ohne seinen Ort zu ändern. Der gleichzeitig vom Fenster erzeugte sehr diffuse Schatten lag dabei auf einer anderen Stufe und kam nicht weiter in Betracht. Das Versuchsergebnis war hierbei dasselbe wie bei vertikaler Skala.

Schon längst hat man zu dem gleichen Zwecke ebenmerkliche Schatten verwendet (vgl. insbesondere die Litteratur bei Fechner 12, I. Teil, S. 147—151), aber in einer ganz anderen Weise. Es wurden dabei zwei Kerzenflammen benutzt; die eine, um durch Änderung ihres Abstandes von einer weißen Fläche deren Lichtstärke zu variieren, die andere entferntere, um den Schatten zu erzeugen. Diese Versuche konnten nicht in einem beliebig stark beleuchteten Zimmer angestellt werden, sondern nur in einem Dunkelzimmer, und man änderte dabei durch die Verschiebung der näheren Flamme immer wieder die Lichtstärke der weißen Fläche und damit auch die Gesamtbeleuchtung der Netzhaut und den Anpassungszustand des Auges. —

Die obigen Beobachtungen zerfallen in mehrere Gruppen. In der ersten handelte es sich um die Wahrnehmung sehr schmaler lichtschwacher Felder (Striche, Buchstaben) auf einem viel lichtstärkeren Grunde, in der letzten um die Unterscheidung größerer Flecke oder Streifen auf einem Grunde von verhältnismäßig wenig verschiedener Lichtstärke. In der ersten Gruppe ergab sich bei gleichbleibendem Verhältnis der Lichtstärken ein so

bedeutender Einfluss der Größe der letzteren auf die Deutlichkeit der Helligkeitsunterschiede, dass zuweilen schon die bloße Verdoppelung bezw. Halbierung aller Lichtstärken genügte, um vorher unmerkliche Einzelheiten merklich, bezw. merklich gewesene unmerklich zu machen, und zwar bei einer Größe dieser Lichtstärken, wie sie beim gewöhnlichen Sehen einer gut beleuchteten Schrift oder Zeichnung in Betracht kommen. In der letzten Gruppe zeigte sich die Ebenmerklichkeit eines Unterschiedes zweier Lichtstärken bei gleichbleibendem Verhältnis derselben innerhalb eines weiteren Gebietes der Lichtstärken von deren absoluter Größe unabhängig. Dies könnte freilich zum Teil der unvollkommenen Homogenität der benutzten Papierflächen zu danken sein. Ein äußerst schwacher Schatten, der auf einer am Kreisel rotierenden Papierfläche noch sichtbar ist, kann unkenntlich werden, sobald die Scheibe stillsteht und das Korn des Papieres merklich wird. Ich habe deshalb die Skalen auch auf rotierenden Kreiselscheiben hergestellt, doch waren die Ergebnisse im wesentlichen dieselben.

Dass die Beobachtungen an sehr feinen Feldern (Perlschriften, Schraffierungen) zu einem ganz andern Ergebnis führen, als die Beobachtungen an größeren Feldern, wird sich später erklären. Zunächst galt es nur, in möglichst einfacher Weise die fragliche Hypothese an verschiedenen Stichproben aus der unerschöpflichen Mannigfaltigkeit der Thatsachen zu prüfen.

Das übereinstimmende Ergebnis aller in diesem Paragraph angeführten Thatsachen ist, dass der Satz, nach welchem gleichen Verhältnissen der Lichtstärken gleichgroße Unterschiede der korrelativen Helligkeiten entsprechen sollten, sich bald gar nicht, bald nur innerhalb verhältnismäßig enger Grenzen der jeweils gegebenen Lichtstärken bestätigen ließ, wenn man die Änderungen des Sehorganes, wie sie durch allgemeine Simultan- und Successivanpassung herbeigeführt werden, soviel als möglich ausschloss. Doch ist nachdrücklich zu betonen, dass dieser Satz immerhin der Wahrheit sehr viel näher kommt, als die im vorigen Paragraph besprochene Annahme, nach welcher gleichen Unterschieden der Lichtstärken gleiche Helligkeitsunterschiede entsprechen würden.

Absichtlich habe ich überall das Hauptgewicht nicht auf die bloße Ebenmerklichkeit der Helligkeitsunterschiede, sondern auf ihre mehr oder weniger große Deutlichkeit überhaupt gelegt, denn auf letztere kommt es beim gewöhnlichen Sehen im wesentlichen an; die Ebenmerklichkeit ist nur der besondere Fall des Minimums der Deutlichkeit.

Auch habe ich vorerst noch keine Rücksicht darauf genommen, dass unter sonst gleichbleibenden Umständen die Deutlichkeit bezw. Ebenmerklichkeit auch von der benützten Netzhautstelle, sowie davon abhängig ist, ob und wie sich das Bild auf der Netzhaut bewegt, entweder infolge von Augenbewegung oder einer Bewegung des bezüglichen Außenobjektes.

Der Thatsache, dass die Deutlichkeit des Sehens sowohl dann abnehmen kann, wenn die Lichtstärken über ein gewisses Maß hinaus-, als wenn sie unter ein gewisses Maß hinabgehen, hat sich selbstverständlich auch FECHNER nicht verschlossen. Aber gerade deshalb müsse es, so meinte er (8, I. Teil, S. 146), schon aus mathematischen Gründen ein gewisses Intervall geben, wo die Deutlichkeit unverändert bleibt. »Nur dass sich die große Ausdehnung eines solchen Intervalles nicht nach bloß mathematischem Gesichtspunkte voraussehen ließ.« Diese »große Ausdehnung« aber schrumpft sehr zusammen, wenn man die von FECHNER nicht beachteten Fehlerquellen zu vermeiden lernt.

Für FECHNER war der Satz, nach welchem gleichen Verhältnissen je zweier Lichtstärken gleichgroße Helligkeitsunterschiede entsprechen sollten, ein notwendiger Folgesatz seines psychophysischen Grundgesetzes, welches ganz allgemein für alle Beziehungen zwischen Physischem und Psychischem gelten sollte, und also auch für die Beziehungen zwischen den Größen der im inneren Auge durch das Licht bewirkten »Erregungen«, die den Reizen direkt proportional sein sollten, und den »Empfindungsstärken«, als welche er die Helligkeiten auffasste. Jenes Grundgesetz selbst aber war nach seiner Ansicht ebensowenig erklärbar, wie damals nach allgemeiner Ansicht das Gravitationsgesetz NEWTON's, mit welchem es FECHNER in Parallele stellte. Nur so konnte es kommen, dass man es weiterhin als etwas Selbstverständliches hinnahm, so oft man fand, dass Lichtstärkenpaaren von gleichem Verhältnis beiläufig gleiche Helligkeitsunterschiede entsprachen, und nur insoweit nach einer Erklärung suchte, als solches nicht der Fall war.

§ 21. **Grundlegendes zum Verständnis der Beziehung zwischen der Helligkeit der tonfreien Farbe und der Lichtstärke des Netzhautbildes.** Angeregt durch E. H. WEBER's Untersuchungen »über die kleinsten Verschiedenheiten der Gewichte, die wir mit den Tastsinn, der Länge der Linien, die wir mit dem Gesicht, und der Töne, die wir mit dem Gehöre unterscheiden können« (18, S. 546), stellte FECHNER (12, I. T. S. 546) den Satz auf, »dass die Größe des Reizzuwuchses gerade im Verhältnisse der Größe des schon zugewachsenen Reizes ferner wachsen muss, um noch dasselbe für das Wachstum der Empfindung zu leisten«, oder »dass gleiche relative Reizzuwüchse gleichen Empfindungszuwüchsen entsprechen«, und nannte diesen Satz, obwohl ihn WEBER nie ausgesprochen hat, das WEBER'sche Gesetz[1]). Angewendet auf die Lichtempfindungen

---

1) E. H. WEBER glaubte aus seinen Untersuchungen schließen zu dürfen, dass für die Unterscheidbarkeit zweier abwechselnd gehobener oder auf die Hand gesetzter Gewichte, sowie zweier nacheinander betrachteter Linien nicht der Unterschied, sondern das Verhältnis derselben maßgebend sei. Dass gleichen Verhältnissen zweier Gewichte oder Linien unabhängig von deren Größe gleichgroße Unterschiede der korrelativen Empfindungen entsprechen sollen, hat er nie behauptet. Es wäre dies auch, wie sich betreffs der Linien unmittelbar versteht, eine paradoxe Behauptung gewesen, da wir offenbar nicht einmal ein ungleichseitiges Dreieck im richtigen Verhältnis seiner drei Seiten sehen könnten, wenn die Längen seiner Seiten für die optische Wahrnehmung dasselbe Verhältnis hätten, wie die Logarithmen ihrer wirklichen Längen. Für die Gewichte liegt die Paradoxie nicht so offen zu Tage, ist aber im Grunde dieselbe (5).

besagte dies im Sinne Fechner's, dass gleichen Verhältnissen der Reizstärken gleichgroße Unterschiede der »Intensitäten« der korrelativen Lichtempfindungen entsprächen, oder anders ausgedrückt, dass die »Intensität der Lichtempfindung« proportional dem Logarithmus der Reizstärke wüchse.

Wenn jedoch, wie in § 9—11 dargelegt wurde, die tonfreien Farben nicht als bloße Intensitätsstufen einer und derselben Empfindungsqualität, sondern als unter sich qualitativ verschieden zu gelten haben, so wird dadurch für die Beziehungen zwischen den Lichtstärken des Netzhautbildes und den korrelativen Helligkeiten im psychischen Sehfelde eine gänzlich veränderte Grundlage geschaffen. Die Möglichkeit aber, diese Beziehungen zwischen den Farben als Qualitäten und den Lichtstärken als Quantitäten rechnerisch darzustellen, ist deshalb gegeben, weil sich, wie in § 10 gezeigt wurde, die Qualität jeder tonfreien Farbe durch ein bestimmtes Verhältnis zweier Variabeln ausdrücken lässt, aus denen, als ihren Komponenten, die Farbe gleichsam zusammengesetzt ist. Auf diese Weise wird die Qualität der tonfreien Farbe auf eine quantitative Beziehung zwischen zwei Variabeln zurückgeführt und die rechnerische Behandlung des hier vorliegenden Problems ermöglicht.

Dachten wir uns alle tonfreien Farben auf einer endlichen Geraden als der ideellen Farbenlinie nach ihrer Helligkeit bezw. Dunkelheit so geordnet, dass an den einen Endpunkt das absolute Schwarz, an den anderen das absolute Weiß zu liegen kam, und gleichen Abständen oder Lageunterschieden zweier Farben gleich große Verschiedenheiten derselben entsprachen, so war durch das Verhältnis der beiden Komponenten W und S einer Farbe zugleich deren Ort auf der Farbenlinie bestimmt (vgl. Fig. 2, S. 34). Als dieser Ort galt uns der Punkt, dessen Abstand vom schwarzen Ende der Farbenlinie sich zum Abstande vom weißen Ende ebenso verhielt wie $W : S$.

Bis dahin erschien die Farbe nur durch dieses Verhältnis charakterisiert. Wenn wir jedoch in einseitiger Weise nur die Weißlichkeit oder Helligkeit der tonfreien Farbe in Betracht zogen, so konnten wir den Abstand ihres Ortes vom schwarzen Endpunkte der Farbenlinie als ein Maß der Helligkeit der Farbe benutzen, sofern wir diesen Abstand auf die gewählte Länge der ganzen Farbenlinie bezogen, d. h. als den entsprechenden Bruchteil dieser Linie nahmen. Betrüge also z. B., wie in Fig. 2 (S. 34), der Abstand des Ortes h vom schwarzen Endpunkt der Farbenlinie $^2/_3$ der ganzen Länge derselben und würden wir diese Länge ganz beliebig $= 1$ setzen, so wäre die Helligkeit der dem Punkt h entsprechenden Farbe ebenfalls $= {}^2/_3$. Setzen wir die Länge der Farbenlinie $= 100$, so ließe sich die Helligkeit jeder Farbe in Prozenten angeben. Allgemein gesagt: Ist W der Abstand des Farbenortes vom schwarzen, S sein Abstand vom weißen Endpunkt

der Farbenlinie, und also die ganze Länge der letzteren $= W + S$, so ist die Weißlichkeit oder Helligkeit der bezüglichen Farbe $= \frac{W}{W+S}$ [1]).

Die Helligkeit (bezw. Dunkelheit) einer tonfreien Farbe lässt sich also auf Grund des Verhältnisses ihrer Komponenten ohne Rücksicht auf die absolute Größe der letzteren eindeutig bezeichnen. Bei gleichem Verhältnis der Komponenten kann aber die Größe derselben sehr verschieden gedacht werden, und es erhebt sich die Frage, ob einer Farbe bei unverändertem Verhältnis ihrer Komponenten und also unveränderter Qualität, bald diese bald jene Größe der Komponenten eigen sein kann. Diese Frage wird später aus einem andern Gesichtspunkte nochmals zu erheben sein, wenn wir von den somatischen Korrelaten der Farben d. h. von den physiologischen Vorgängen zu handeln haben werden, an welche die Farben als psychische Phänomene geknüpft sind (vgl. § 24). Hier möge es genügen, darauf hinzuweisen, dass sowohl psychologische als psychophysiologische Überlegungen dazu nötigen, einer und derselben Farbe eine verschieden große psychische Bedeutung zuzuerkennen, je nachdem bei gleichem Verhältnis ihrer Komponenten der Wert der letzteren größer oder kleiner ist. Ein und dieselbe Farbe kann, wie ich einst gesagt habe (4, § 29), ein sehr verschiedenes psychisches Gewicht haben. Je nachdem

---

1) Wie ich erfahren habe, ist diese Art der Bezeichnung der Helligkeit einigen Lesern des § 10 nicht recht verständlich geworden. Es sei mir deshalb gestattet, das eigentlich sehr einfache Prinzip dieser Bezeichnungsweise an einem, dem praktischen Leben entnommenen Beispiele zu erläutern.

Messing ist ein Gemisch aus Kupfer (K) und Zink (Z) und hat je nach dem Verhältnis, in dem dieselben gemischt sind, eine verschiedene Qualität (»Rotmessing«, »Gelbmessing«, »Weißmessing«). Zur Bezeichnung dieser Qualität kann man entweder das Mischungsverhältnis ($K:Z$) benutzen oder aber angeben, welcher Bruchteil des Messings aus Kupfer, bezw. welcher Bruchteil aus Zink besteht, und auf diese Weise sozusagen den Grad der Kupfrigkeit bezw. der Zinkigkeit des Messings ausdrücken. Verhielte sich z. B. in dem Gemisch $K:Z = 3:7$, oder anders gesagt, wäre $\frac{K}{Z} = \frac{3}{7}$, so wäre die Kupfrigkeit des Gemisches $\frac{3}{3+7} = 0{,}3$ und seine Zinkigkeit $\frac{7}{3+7} = 0{,}7$. Ob ich den einen oder anderen Ausdruck zur Bezeichnung der Qualität wähle, ist gleichgültig und lediglich Sache der Vereinbarung.

So lässt sich denn auch die Qualität einer tonfreien Farbe, in der sich die weiße zur schwarzen Komponente wie $3:7$ verhält, durch dieses Verhältnis $\left(\frac{W}{S} = \frac{3}{7} \text{ oder } \frac{S}{W} = \frac{7}{3}\right)$ ausdrücken. Man kann aber auch den Grad der Weißlichkeit $\left(\frac{W}{W+S} = \frac{3}{3+7}\right)$, d. i. die Helligkeit, zur Bezeichnung der Farbe benutzen, darf jedoch dabei nicht vergessen, dass sich dieselbe Farbe ebenso gut durch den Grad ihrer Schwärzlichkeit $\left(\frac{S}{S+W} = \frac{7}{3+7}\right)$, d. i. ihre Dunkelheit, bezeichnen ließe.

ihr Gewicht groß oder klein ist, sind auch ihre Komponenten entsprechend groß oder klein; denn das Gewicht einer Farbe ist die Summe der Gewichte der Komponenten. Während vom Verhältnis der Komponenten die Qualität der Farbe abhängt, wird die Energie, mit welcher sie sich in unser Bewusstsein drängt, kurz gesagt die Auf- oder Eindringlichkeit der Farbe durch das Gewicht derselben bestimmt. Wollen wir also eine im psychischen Sehfelde gegebene tonfreie Farbe erschöpfend bezeichnen, so dürfen wir uns nicht mit der Angabe des Verhältnisses ihrer beiden Komponenten begnügen. So wäre durch die Gleichung $\frac{W}{S} = \frac{3}{2}$ wohl die Qualität bezw. die daraus ableitbare Helligkeit $\left(\frac{3}{3+2} = 0{,}6\right)$ der Farbe bestimmt, noch nicht aber ihr Gewicht, während durch die Doppelgleichung $\frac{W = 6}{S = 4}$ die bezügliche Farbe in jeder Beziehung charakterisiert ist. Denn wir ersehen aus dieser Doppelgleichung nicht nur die Qualität und die Helligkeit $\left(\frac{6}{6+4} = 0{,}6\right)$ der Farbe, sondern auch ihr Gewicht ($6 + 4 = 10$). Überall, wo es nicht bloß auf die Qualität und die Helligkeit bezw. Dunkelheit einer Farbe ankommt, müssen wir uns zu ihrer Bezeichnung einer solchen Doppelgleichung bedienen. —

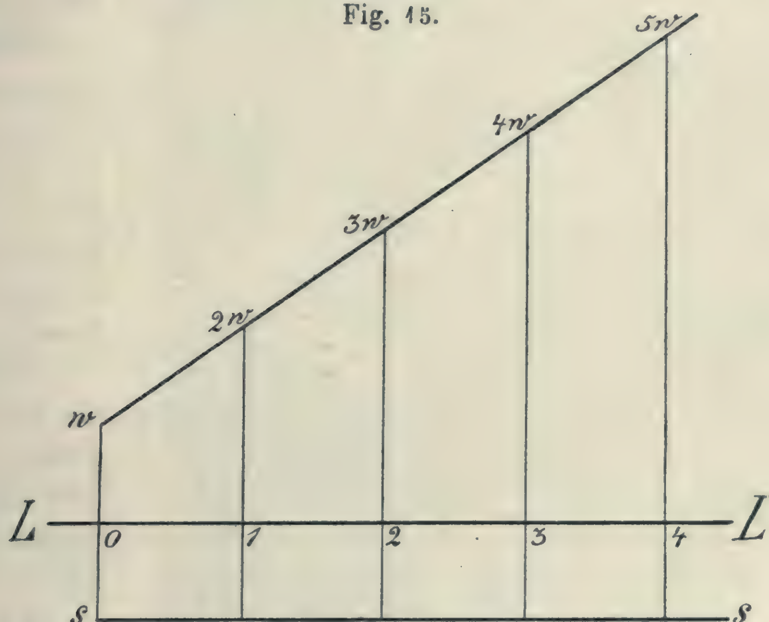
Mögen unsere Augen offen oder geschlossen sein, möge unser Gesichtsfeld in tiefster Finsternis liegen oder beliebige Strahlungen auf unsere Netzhaut schicken, immer haben alle Stellen unseres psychischen Sehfeldes, sobald wir überhaupt auf dasselbe achten, irgendwelche Farbe; denn aus Farben besteht unser Sehfeld und ohne Farben giebt es kein solches.

Die Farben, welche bei gänzlich verfinsterten Augen unser Sehfeld bilden, nannten wir die Eigenfarben desselben, und es wurde schon erwähnt, dass an verschiedenen Stellen des Sehfeldes die Eigenfarbe gleichzeitig eine verschiedene und an derselben Stelle eine mit der Zeit mehr oder weniger schnell wechselnde sein kann. Gleichviel nun, welche Eigenfarbe eine Sehfeldstelle eben hat, es tritt, sobald die Netzhaut vom Lichte der Außenwelt getroffen wird, an die Stelle dieser sozusagen autonomen Farbe im allgemeinen eine andere, allonome Farbe. Unter der Wirkung des Lichtes ändert sich also das Verhältnis $W : S$ an der bezüglichen Stelle des psychischen Sehfeldes, was rein theoretisch betrachtet entweder durch einseitige Änderung des Wertes der weißen Komponente bei gleichbleibender schwarzer, oder durch Änderung der letzteren bei gleichbleibender weißer, oder endlich durch gleichzeitige Änderung beider Komponentenwerte möglich wäre. Welcher von diesen Fällen der Wirklichkeit entspricht, wird später zu erörtern sein. Hier sei zunächst die denkbar einfachste Annahme gemacht, dass infolge der Bestrahlung der Netzhaut

nur die weiße Komponente der Farbe ihren Wert ändert und zwar derart, dass der Zuwuchs, den sie dabei erhält, unter sonst gleichbleibenden Umständen der wirkenden Lichtstärke direkt proportional ist, während die schwarze Komponente dabei unverändert bleibt. Ob dies in Wirklichkeit vorkommen kann, bleibt zunächst ganz unberücksichtigt; denn es gilt hier nur zu zeigen, wie aus der im Obigen entwickelten Auffassung des Wesens der tonfreien Farben sich das verständlich machen lässt, was einst FECHNER aus seinem psychophysichen Grundgesetze zu erklären versuchte.

Auf der Geraden LL (Fig. 15) als Abscissenachse möge die Größe der jeweiligen weißen Komponente der Farbe durch eine nach oben, die der schwarzen durch eine nach unten gerichtete Ordinate ausgedrückt werden.

Fig. 15.



Die beiden dem Punkte 0, als dem Nullpunkte des Koordinatensystemes, entsprechenden Ordinaten w und s seien zunächst gleichgroß, womit zugleich gesagt ist, dass als die unmittelbar vor der Bestrahlung bestehende Eigenfarbe das mittle Grau von der Helligkeit 0,5 angenommen ist. Auf der Abscissenachse sind die Lichtstärken eingetragen, und es ist als Einheit der Lichtstärke diejenige genommen, durch welche die weiße Komponente einen ihrem anfänglichen Werte w gleichen Zuwuchs erfährt und also auf den Wert $2w$ gebracht wird. Die jetzt erscheinende allonome Farbe wäre also durch $2w : s$, ihre Helligkeit durch $\frac{2w}{s + 2w}$ und ihr Gewicht durch $2w + s$ ausgedrückt. Kurzum es würde durch ein Licht l die weiße Komponente auf den Wert $w + lw = w(l + 1)$ gebracht werden, so dass die nunmehr erscheinende Farbe durch $w(l + 1) : s$, ihre Helligkeit durch $\frac{w(l + 1)}{w(l + 1) + s}$, und ihr Gewicht durch $w(l + 1) + s$ auszudrücken wäre.

In Fig. 15 wäre uns also unter den angenommenen Bedingungen für jede beliebige Lichtstärke durch das Verhältnis der oberen Koordinate zur unteren die Qualität der Farbe und mittelbar ihre Helligkeit, durch die Summe beider Ordinaten aber das Gewicht der Farbe gegeben. Der entsprechende Ort der Farbe auf einer ideellen Farbenlinie wäre derjenige, dessen Abstand vom schwarzen Endpunkte sich zum Abstand vom weißen Endpunkte ebenso verhält, wie die obere Koordinate des bezüglichen Abscissenpunktes zur unteren.

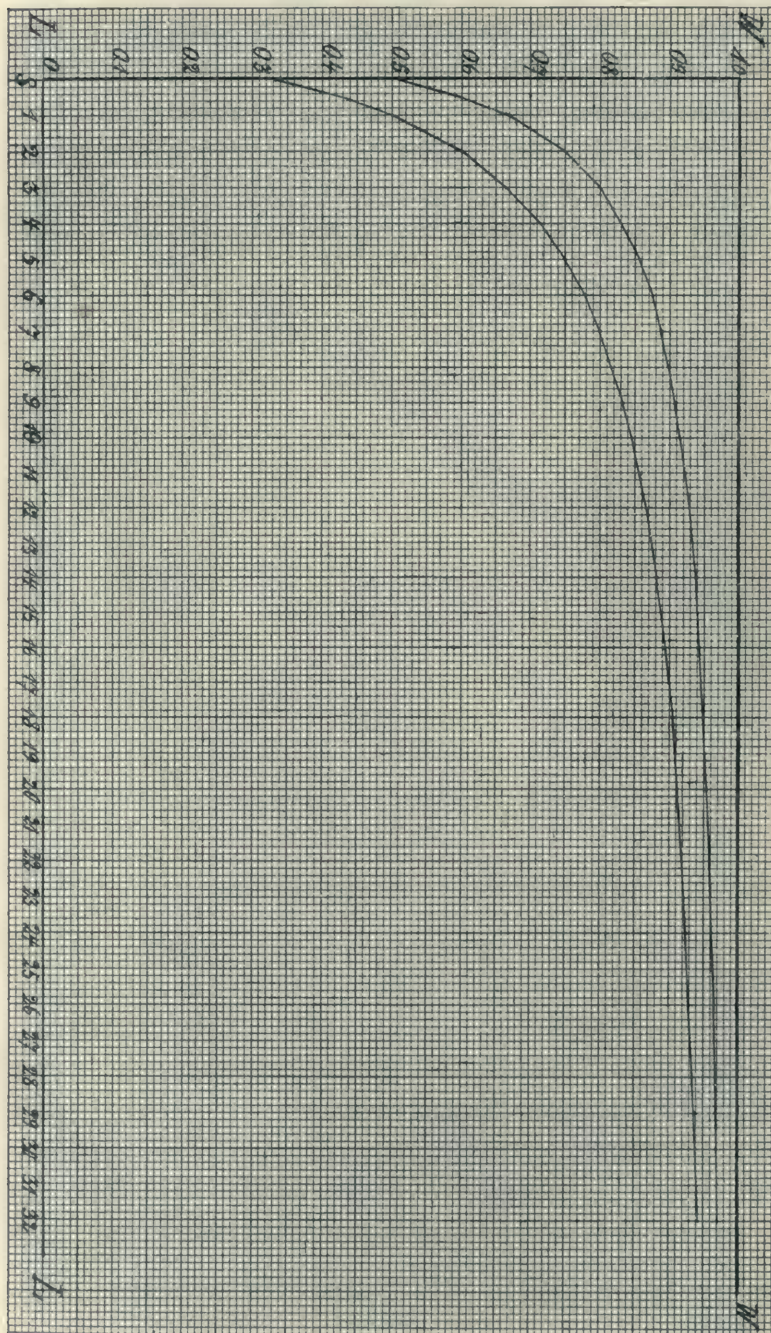


Fig. 16.

Somit macht die Figur 15 zugleich anschaulich, dass das Gewicht der Farbe linear mit der Lichtstärke wüchse, und zwar wären seine Zuwüchse hier gleich den durch die Lichtstärke bedingten Zuwüchsen zur weißen Komponente der Farbe.

Statt wie im Obigen von dem mittlen Grau als Eigenfarbe auszugehen, könnten wir eine beliebige dunklere Farbe als die unmittelbar vor der Bestrahlung vorhandene Eigenfarbe wählen, und müssten dann den Ordinaten des Nullpunktes ein entsprechend anderes Verhältnis geben.

In welcher Weise nun die Helligkeit der Farbe von der eben wirkenden Lichtstärke abhängig wäre, möge die Fig. 16 veranschaulichen. In derselben bedeutet die Gerade SW die ideelle Farbenlinie, auf welcher alle tonfreien Farben derart angeordnet sind, dass gleichen Lageverschiedenheiten zweier Farben gleiche Helligkeitsunterschiede derselben entsprechen. Punkt S ist hiernach der Ort des absoluten Schwarz von der Helligkeit 0, Punkt W der Ort des absoluten Weiß von der maximalen Helligkeit 1. Punkt S ist zugleich der Nullpunkt eines Koordinatensystems, auf dessen Abscissenachse LL wir uns wieder die Lichtstärken abgetragen denken, während die entsprechenden Farben- oder Helligkeitsorte in die Farbenlinie als Ordinatenachse einzutragen sind. Aus dem Abstande eines solchen Farbenortes vom Fußpunkt S der Farbenlinie ergiebt sich die zum bezüglichen Abscissenpunkte gehörige Ordinate. Als Lichteinheit ist wieder diejenige Lichtstärke genommen, welche unter den gegebenen Bedingungen der vor der Bestrahlung bestehenden weißen Komponente W der Eigenfarbe einen dieser Komponente gleichgroßen Zuwuchs erteilt[1]).

Die obere Kurve veranschaulicht die Beziehungen zwischen den Unterschieden der Lichtstärken und den Helligkeitsunterschieden der korrelativen Farben für den Fall, wo die vor jeder Bestrahlung vorhandene Eigenfarbe immer wieder das Mittelgrau und also $W = S$ ist, die untere Kurve für den Fall, wo die Eigenfarbe eine dunklere und zwar $\frac{W}{S} = \frac{1}{2}$, und also die Helligkeit derselben $= \frac{1}{1+2} = \frac{1}{3}$ ist. Jede Kurve ist ein Teilstück des einen Zweiges einer gleichseitigen Hyperbel, deren eine Asymptote WW dem Ordinatenwert 1 d. h. dem der maximalen Helligkeit entspricht.

Man ersieht aus beiden Kurven, wie gleichen Unterschieden der Lichtstärken um so kleinere Helligkeitsunterschiede der bezüglichen Farben entsprechen, je größer die beiden Lichtstärken sind, wie die Helligkeit anfangs schneller und dann immer langsamer mit der Lichtstärke wächst und sich asymptotisch der Helligkeit 1 nähert.

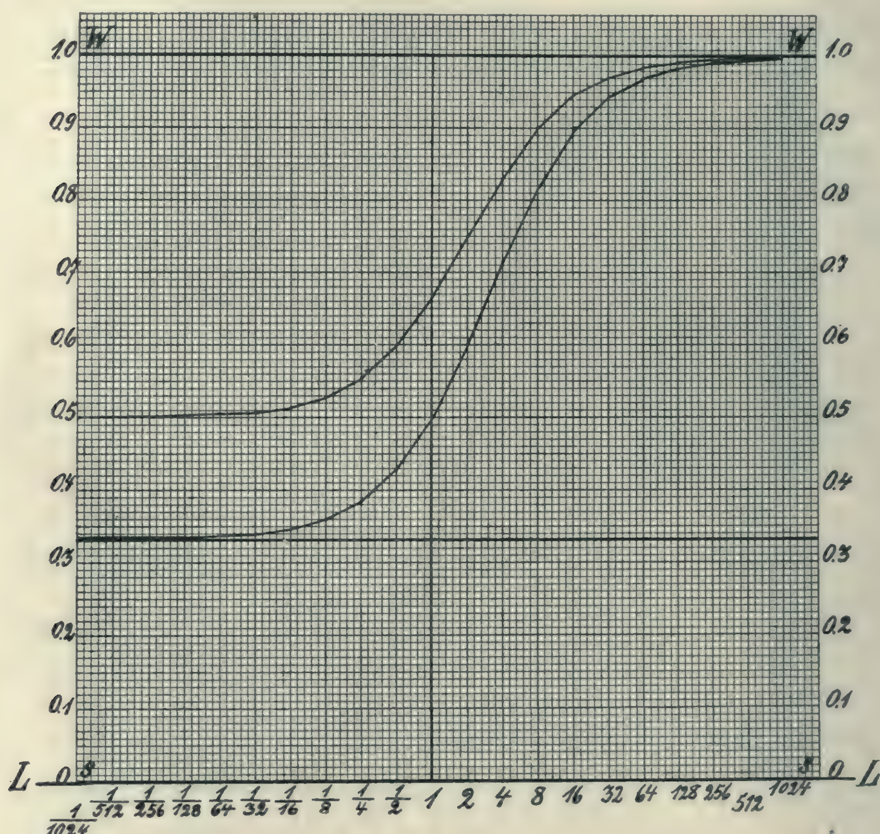
Da bei Änderungen der Stärke der allgemeinen Beleuchtung zwar die Unterschiede der Lichtstärken im Netzhautbilde sich ändern, die Verhältnisse derselben aber unter sonst gleichbleibenden Umständen unverändert bleiben (vgl. § 20), so möge auch die Art, in welcher die Helligkeitsunterschiede der Farben von der Stärke der allgemeinen Beleuchtung des Gesichtsfeldes unter den hier gemachten Voraussetzungen abhängig sein würden, für die beiden soeben besprochenen Fälle durch die entsprechenden Kurven anschaulich gemacht werden.

---

1) Welche Länge man der Farbenlinie (SW) relativ zur gewählten Einheit der Abscissenwerte giebt, ist gleichgültig.

In Fig. 17 sind auf der Abscissenachse *LL* die Lichtstärken jetzt derart abgetragen, dass nicht gleichen Unterschieden, sondern gleichen Verhältnissen derselben gleichgroße Strecken entsprechen, wobei ganz willkürlich die Lichtstärke 1 als der Ausgangspunkt für die Abmessungen nach rechts und links genommen ist. Als jeweilige Ordinate gilt wieder der Abstand des Ortes der bezüglichen Farbe vom Endpunkte *S* der Farbenlinie. Der Nullpunkt des Koordinationssystems ist jetzt nach links in unendliche Ferne gerückt.

Fig. 17.



Eine auf diese Weise gewonnene Kurve hat, wie sich von vornherein versteht, zwei parallele Asymptoten, erstens wieder die Gerade *WW*, deren Abstand von der Abscissenachse der maximalen Helligkeit 1 entspricht, und zweitens diejenige Gerade, deren Abstand von der Abscissenachse der bei der Lichtstärke 0 bestehenden Eigenfarbe entspricht. Für die obere Kurve ist die Helligkeit der letzteren, wie schon gesagt, gleich $^1/_2$, für die untere gleich $^1/_3$ angenommen.

Je steiler ein Kurvenstück verläuft, desto größer ist bei gleichem Verhältnis zweier Lichtstärken der Helligkeitsunterschied der beiden zugehörigen Farben. Man sieht, wie der, einem konstanten Lichtstärkenverhältnis entsprechende Helligkeitsunterschied bei

den kleinsten Lichtstärken minimal ist, mit der Zunahme der absoluten Lichtstärken anfangs langsam, dann immer schneller und in einem bestimmten Bereiche der Lichtstärken am schnellsten wächst, um über diesen Bereich hinaus erst schnell und dann immer langsamer wieder abzunehmen. *Die Kurven zeigen ferner, wie in demjenigen Bereiche der Lichtstärken, wo einem konstant bleibenden Verhältnisse derselben die größten Helligkeitsunterschiede entsprechen, diese Unterschiede nahezu unabhängig sind von der absoluten Lichtstärke, so dass hier mit größter Annäherung gleichen Verhältnissen der Lichtstärken auch äquidifferente Farbenpaare und also gleiche Helligkeitsunterschiede entsprechen.*

Denken wir uns, die Netzhaut empfange das Bild zweier aneinandergrenzender Flächen des Außenraumes, deren beide Lichtstärken bei den verschiedensten Stärken ihrer gemeinsamen Beleuchtung dasselbe Verhältnis behalten; denken wir ferner, wir würden diese Flächen bei den verschiedenen Beleuchtungen immer wieder mit denselben Netzhautteilen betrachten, und die Eigenfarbe der korrelativen Sehfeldstellen wäre vor jeder Einzelbetrachtung der Fläche immer wieder dieselbe. Auf Grund der Kurven wäre dann zu erwarten, dass ein Helligkeitsunterschied der beiden Flächen bei minimalen Beleuchtungen derselben nicht merklich sein, bei entsprechend stärkeren aber deutlich und immer deutlicher werden würde, dass er ferner innerhalb eines bestimmten Bereiches der Beleuchtungsstärken sein Maximum erreichen und innerhalb dieses Bereiches konstant bleiben würde, bis bei noch stärkeren Beleuchtungen die Größe und Deutlichkeit des Helligkeitsunterschiedes wieder abnehmen müsste.

In Wirklichkeit liegen freilich die Dinge nicht so einfach, wie hier aus methodischen Rücksichten vorerst angenommen wurde. Wir werden sehen, dass die Farbe einer Sehfeldstelle selbst unter sonst ganz gleichbleibenden Umständen keineswegs nur von der Belichtungsstärke der bezüglichen Netzhautstelle, sondern auch von der gleichzeitigen Belichtung der übrigen Netzhaut abhängig ist, und dass unter dem Einflusse der Belichtung nicht nur die weiße, sondern sofort auch die schwarze Komponente der Farbe ihren Wert ändern kann. Aber das Gesetz, nach welchem die Helligkeitsunterschiede von den Unterschieden der Lichtstärken abhängen, bleibt dabei, wie sich später zeigen wird, wenigstens in seinen Grundzügen dasselbe, und immer ergiebt sich ein bald weiteres, bald engeres Gebiet der Lichtstärken, innerhalb dessen gleichen Verhältnissen der Lichtstärken angenähert gleiche Helligkeitsunterschiede der korrelativen Farben (äquidifferente Farbenpaare) entsprechen, ein Gebiet also, für welches das Weber'sche Gesetz praktisch genommen gültig sein würde.

Hier sollte nur gezeigt werden, dass meine Auffassung des Wesens der tonfreien Farben einen ganz anderen Weg zum Verständnis der von

Fechner jenem Gesetze untergeordneten Thatsachen eröffnet, als es der von ihm selbst eingeschlagene war.

Die im Vorhergehenden gemachte Annahme, dass die weiße Komponente der tonfreien Farbe unter der Wirkung des Lichtes einen der Stärke desselben direkt proportionalen Zuwuchs erfährt, steht in Analogie mit der, insbesondere von Fechner vertretenen und noch herrschenden Annahme, nach welcher während der Lichtwirkung zu einer stetigen, durch einen innern Reiz bewirkten »Erregung« des Sehorganes ein der Lichtstärke proportionaler Zuwuchs hinzugefügt werden soll. Das psychische Korrelat dieser Erregung aber, nämlich die »Intensität oder Helligkeit der Lichtempfindung«, sollte nach Fechner der Stärke jener Erregung nicht proportional sein, sondern nur logarithmisch mit derselben wachsen. Unter den hier von mir vorläufig gemachten Voraussetzungen aber bestände bei sonst ganz gleichbleibenden Umständen eine durchgängige direkte Proportionalität zwischen der physiologischen und der psychischen Wirkung des Lichtes, welche letztere allerdings nur die weiße Komponente der tonfreien Farbe betreffen würde, während dabei die schwarze, wie vorläufig angenommen wurde, einen konstanten Wert behalten könnte.

Wer die Konsequenzen des Fechner'schen Gesetzes kennt, wird schon bemerkt haben, dass nach der hier entwickelten Auffassung die negativen Lichtempfindungen Fechner's nicht existieren.

IV. Abschnitt.

Vom somatischen Korrelate der tonfreien Farben.

§ 22. Der Stoffwechsel der Sehsubstanz als das somatische Korrelat der Farben. Ich gehe, wie schon in § 7 betont wurde, von der Voraussetzung aus, dass jeder Farbe in gesetzmäßiger Weise ein ganz bestimmter Vorgang in der nervösen Substanz des Sinnesorganes entspricht. Denn ohne die Annahme einer solchen gesetzmäßigen Beziehung wäre es müßig, die Sinnesphänomene zum Gegenstande physiologischer Erwägungen zu machen.

Bezeichnen wir diejenigen Teile des inneren Auges, an deren Zustände die Farben des psychischen Sehfeldes unmittelbar geknüpft sind, als die Sehsubstanz, so dürfen wir sagen, es entspreche jeder Farbe eine ganz bestimmte Regung des bezüglichen Teiles dieser Substanz derart, dass Farbe und Regung unabänderlich an einander gebunden sind. Hiernach findet das stoffliche Geschehen in der Sehsubstanz seinen psychischen Ausdruck durch die jeweiligen Farben des Sehfeldes, und letztere finden ihren physischen Ausdruck durch gleichzeitig in der Sehsubstanz ablaufende Vorgänge; der Mannigfaltigkeit der einen entspricht bis ins Einzelne die Mannigfaltigkeit der anderen.

Die Physiker haben die optischen Strahlungen mit den Namen derjenigen Farben belegt, welche uns unter gewöhnlichen Umständen durch diese Strahlungen erweckt werden; mit größerem Rechte dürften wir, wie schon eingangs

bemerkt wurde, die, den verschiedenen Farben korrelativen Regungen der Sehsubstanz nach diesen Farben benennen. Denn während uns eine und dieselbe Strahlung unter verschiedenen Nebenbedingungen sehr verschiedene Farben erwecken kann, entspricht jeder bestimmten optischen Regung der nervösen Substanz nur eine ganz bestimmte Farbe. Es erscheint in der That der Kürze wegen nicht unzweckmäßig, von einer schwarzen, grauen, roten Regung der Sehsubstanz zu sprechen. Die bezügliche Regung wird auf diese Weise ganz eindeutig bezeichnet, und ein Missverständnis ist hier nicht zu fürchten.

Im Sinne der soeben entwickelten Auffassung haben wir für die Reihe der schwarz-weißen oder tonfreien Farben eine entsprechende Reihe unter einander verwandter Regungen der Sehsubstanz anzunehmen. Wie sich die Mannigfaltigkeit jener Farben als eine solche mit nur zwei Variablen betrachten ließ, durch deren gegenseitiges Verhältnis die einzelne Farbe bestimmt wird, so werden wir auch für die Mannigfaltigkeit der korrelativen Prozesse in der Sehsubstanz zwei dem Schwarz und Weiß entsprechende Variable anzunehmen haben, von deren gegenseitigem Verhältnis, wie dort die Beschaffenheit der Farbe, so hier die Beschaffenheit der korrelativen physischen Regung abhängt.

Das Wesen des Lebens liegt in physischer Hinsicht im Stoffwechsel der lebendigen Substanz, bei welchem einerseits Stoffe entstehen, welche von der lebendigen Substanz als etwas ihr fremd gewordenes ausgesondert werden, andererseits aber und zwar gleichzeitig Stoffe aufgenommen, von der lebendigen Substanz angeeignet und zu Bestandteilen ihrer selbst gemacht werden. Den letzteren Vorgang hat man unter Erweiterung eines alten aus der Pflanzenphysiologie stammenden Begriffs als Assimilation benannt, und nach diesem Vorbilde habe ich seinerzeit für den erstgenannten Vorgang die seitdem gebräuchlich gewordene Bezeichnung Dissimilation gewählt (4, § 27).

»Indem wir, so sagte ich, diese beiden Vorgänge begrifflich trennen, dürfen wir uns doch nicht dazu verführen lassen, sie als zwei wirklich nur nebeneinander laufende Prozesse aufzufassen, und uns die lebendige Substanz etwa wie eine innerlich ruhende Masse vorzustellen, welche nur von der einen Seite her verbraucht und von der anderen Seite her wieder aufgebaut wird. Wir haben uns vielmehr Assimilation und Dissimilation als zwei innig ineinander verflochtene Prozesse zu denken, welche den, seinem eigentlichen Wesen nach unbekannten Stoffwechsel der lebendigen Substanz ausmachen und in allen kleinsten Teilen der letzteren zugleich stattfinden, daher diese Substanz nichts Stetiges oder Ruhendes, sondern ein immer mehr oder minder innerlich Bewegtes, sich Regendes darstellt« (19, S. 35).

Nimmt man nun an, dass dieser Stoffwechsel der lebendigen Sehsubstanz das somatische Korrelat der Farben des Sehfeldes ist, so eröffnet sich die Möglichkeit, eine Fülle bis dahin zusammenhangslos nebeneinander verzeichneter Thatsachen unter einen einheitlichen, umfassenden Gesichtspunkt

zu bringen, aus dem ihre gegenseitige Beziehung und ihr innerer Zusammenhang ersichtlich und bis zu einem gewissen Grade verständlich wird. So viel leistet für heute diese Annahme, dass es in methodischer Hinsicht fast gleichgültig erscheint, inwieweit sie der Wahrheit nahe kommt. Denn in ihrem Lichte tritt an die Stelle des Konglomerates vereinzelt festgestellter Thatsachen ein organisch gegliedertes und in sich geregeltes Getriebe, in dem die Bedeutung des einzelnen Gliedes aus seinem Zusammenhange mit den übrigen klar wird. Deshalb ist auch der methodische Wert der Annahme nicht an ihre Richtigkeit gebunden, und wenn Manche meinen Versuch einer Theorie des Lichtsinns nur deshalb von vornherein ablehnten, weil sie über das Wesen des Lebens, über die psychophysischen Prozesse und über die Beziehungen zwichen Leib und Seele anders dachten als ich, so ließen sie außer acht, dass der Wert einer Hypothese von dem abhängt, was sie leistet, nicht aber von den Vorstellungen, die sich der Einzelne vom wahren Wesen des von der Hypothese umfassten Geschehens macht.

Beschränken wir uns wieder zunächst auf die tonfreien Farben, so finden wir in der Dissimilation und Assimilation der Sehsubstanz zwei Variable ihres Stoffwechsels, die sich als die somatischen Korrelate der beiden Variabeln Weiß und Schwarz betrachten lassen. Mit demselben Rechte oder Unrechte, mit dem wir irgend ein gegebenes Grau in eine weiße und eine schwarze Komponente zerlegt denken konnten, lässt sich der Stoffwechsel der Sehsubstanz als aus den genannten beiden Teilprozessen bestehend denken. Hier wie dort handelt es sich um die begriffliche Spaltung eines zunächst einheitlich Gegebenen, welches je nach dem Überwiegen der einen oder der anderen seiner beiden gedachten Komponenten nach zwei entgegengesetzten Richtungen zu variieren vermag. Wie in den verschiedenen tonfreien Farben das Verhältnis der Deutlichkeit der Weiße und Schwärze ($W : S$) ein verschiedenes ist, so im korrelativen Stoffwechsel das Verhältnis zwischen der Größe der Dissimilation und der gleichzeitigen Assimilation ($D : A$). Sind beide gleich groß, so entspricht dieser Stoffwechselweise das mittle Grau, in welchem die Schwärze und Weiße gleich deutlich oder gleich undeutlich sind. Ist die Dissimilation größer als die Assimilation, so ist in demselben Verhältnis in der korrelativen Farbe die Weiße deutlicher als die Schwärze, und gilt für den Stoffwechsel der Sehsubstanz das Umgekehrte, so gilt es auch für die korrelative Farbe.

Der Gesamtheit aller jener denkbaren Verhältnisse zwischen A und D, in denen A größer ist als D, entspricht die vom reinsten Schwarz bis zu dem oben erwähnten Mittelgrau reichende Hälfte der tonfreien Farbenreihe, und der Gesamtheit aller Verhältnisse, in denen D größer als A, die von jenem Mittelgrau bis zum reinsten Weiß sich erstreckende andere Hälfte der Farbenreihe.

Auf der ideellen Farbenlinie, auf der wir uns sämtliche tonfreie Farben systematisch geordnet dachten (vgl. § 10 u. 11), entsprach jeder einzelnen Farbe ein bestimmter Ort, und das Verhältnis der beiden Abstände dieses Ortes vom schwarzen und weißen Endpunkt der Linie war uns ein Ausdruck für das Verhältnis der Deutlichkeit der beiden Komponenten der Farbe. Die Helligkeit oder den Weißlichkeitsgrad der Farbe aber konnten wir ausdrücken durch das Verhältnis ihres Abstandes vom schwarzen Endpunkte der Farbenlinie zu der willkürlich gewählten Länge derselben, d. h. durch $\frac{W}{S+W}$. Dieses Verhältnis aber ist nach dem oben Gesagten zugleich das Verhältnis, welches im korrelativen Stoffwechsel zwischen der Größe der Dissimilation und der Gesamtgröße des Stoffwechsels als der Summe der gleichzeitigen Dissimilation und Assimilation besteht, d. h. es ist

$$\frac{W}{S+W}=\frac{D}{A+D}.$$

In dieser einfachen Weise lassen sich nach meiner Auffassung die Beziehungen zwischen der Qualität bezw. Helligkeit einer tonfreien Farbe und dem korrelativen Stoffwechsel der Sehsubstanz zum Ausdruck bringen.

§ 23. Die Selbststeuerung des Stoffwechsels der Sehsubstanz. Wenn eine lebendige Substanz nur unter dem Einfluss ihrer zunächst als konstant angenommenen Lebensbedingungen steht, denen sie vollständig angepasst ist, und wenn alle nur gelegentlichen und vorübergehenden Reize ausgeschlossen sind, so bezeichne ich ihren Stoffwechsel bezw. ihre Dissimilation und Assimilation als autonome. Denn obgleich sich auch jene Lebensbedingungen als den Stoffwechsel mitbedingende konstante Reize auffassen lassen, empfiehlt sich doch die übliche Unterscheidung derselben von den nur gelegentlich oder wenigstens inkonstant wirkenden Reizen im engeren Sinne, denen freilich streng genommen auch jede Änderung einer bis dahin konstant gewesenen Lebensbedingung beizuzählen ist. Sobald aber der Stoffwechsel der lebendigen Substanz mit unter der Einwirkung eines gelegentlichen Reizes steht, nenne ich ihn allonom.

Im Sinne dieser Auffassung ist der Stoffwechsel der Sehsubstanz ein allonomer, so oft Licht ins Auge fällt, und ein autonomer, so oft die Augen der Einwirkung des Lichts vollkommen entzogen sind, und auch sogenannte inadäquate (mechanische, chemische, elektrische) Reize nicht in Betracht kommen.

Die psychischen Korrelate dieses autonomen Stoffwechsels sind alle Farben, jedes Hell und jedes Dunkel, die wir bei Ausschluss des Lichts und anderer gelegentlicher Reize sehen, insbesondere das sogenannte Eigenlicht des Auges, und die bei Verfinsterung desselben sichtbaren Nach-

bilder. Alle diese Farben lassen sich als autonome bezeichnen, zum Unterschied von den allonomen Farben, welche unter der Mitwirkung des Lichts entstehen.

Der Begriff der autonomen bezw. allonomen Farbe deckt sich keineswegs mit dem der »subjektiven« bezw. »objektiven« Farbe, denn als subjektive Farben gelten der naiven Auffassung außer den autonomen auch alle diejenigen, welche nicht den sogenannten wirklichen Farben der Außendinge oder der bezüglichen Lichtstrahlen entsprechen, sondern die vermeintliche Folge einer »optischen Täuschung« über diese »objektive« Farbe sind, wie z. B. bei offenem Auge gesehene Kontrastfarben.

Für die Mannigfaltigkeit der allonomen Farben konnte man ohne weiteres die ins Auge fallenden Strahlungen verantwortlich machen, für die Mannigfaltigkeit der autonomen bietet sich keine so bequeme Erklärung. Auch die Art der Abhängigkeit der ersteren vom Lichte lässt sich nur verstehen, wenn man sie nicht als ein bloßes Produkt der einfallenden Strahlung, sondern als das psychische Abbild der durch das Licht mitbestimmten Lebensregungen der Sehsubstanz betrachtet, von deren jeweiliger Stimmung die erscheinende Farbe nicht weniger abhängig ist, als vom eben einwirkenden Lichte.

Diejenige Beschaffenheit der Sehsubstanz, welche sie nach hinreichend langem Schutze des Auges vor jedem Licht angenommen hat, und wobei ihre autonome Dissimilation und Assimilation durchschnittlich gleich groß sind, wenn sie auch infolge kleiner Inkonstanz der Lebensbedingungen zwischen engen Grenzen um den Punkt genauen Gleichgewichts hin- und herschwanken, bezeichne ich als die mittelwertige Beschaffenheit. Denken wir uns nun, es werde jetzt infolge einer Belichtung der Netzhaut das Verhältnis zwischen Dissimilation und Assimilation zu Gunsten der ersteren geändert, so wird dabei die Sehsubstanz eine Änderung erfahren, insofern dabei ihr chemischer Aufbau, oder wie sonst man es nennen will, geändert wird. Diese absteigende Änderung, wie ich sie genannt habe, wird um so schneller erfolgen, je größer der Überschuss der Dissimilation über die Assimilation (D — A) ist, und wird um so größer werden, je länger ein solcher Überschuss besteht. Dabei durchläuft die Substanz eine Reihe von Beschaffenheiten, welche ich als unterwertige bezeichnet habe. Wird dann der durch die Belichtung der Netzhaut für die Sehsubstanz gegebene Reiz zur Steigerung der Dissimilation (D-Reiz) durch Verfinsterung der Augen wieder beseitigt, so bleibt die Substanz zunächst als eine unterwertige zurück, und ihre Unterwertigkeit ist um so größer, je größer zuvor der D-Überschuss war und je länger ein solcher bestand.

Jede lebendige Substanz besitzt das Vermögen, aus einem solchen durch D-Reize herbeigeführten Zustand der Unterwertigkeit nach Aufhören des Reizes in den der Mittelwertigkeit zurückzukehren, wenn nur ihre Lebens-

bedingungen fortbestehen. Diese Rückkehr (restitutio in integrum) ermöglicht sie durch eine gesteigerte Assimilation, und wir dürfen annehmen, dass diese Steigerung der autonomen Assimilation um so bedeutender ist, je unterwertiger die Substanz unter dem Einfluss des D-Reizes geworden war. An die Stelle des während der Reizung bestandenen D-Überschusses tritt jetzt ein A-Überschuss (A — D), der eine aufsteigende Änderung der Substanz mit sich bringt, wobei letztere die erwähnte Reihe der unterwertigen Beschaffenheiten in umgekehrter Richtung wieder durchläuft, um so in den Zustand der Mittelwertigkeit zurückzukehren. Je mehr sie sich dieser Beschaffenheit wieder nähert, desto kleiner wird der jeweilige A-Überschuss, desto kleiner die Geschwindigkeit der aufsteigenden Änderung, bis schließlich Assimilation und Dissimilation wieder gleich sind und die Substanz wieder mittelwertig ist.

Je mehr sich die Sehsubstanz unter dem Einflusse eines D-Reizes absteigend verändert und also unterwertig wird, desto kleiner wird ihre Eignung oder Disposition δ zur Dissimilation, desto größer ihre Disposition α zur Assimilation, und wenn alle ihre Lebensbedingungen derart geblieben sind, dass sie der geänderten Disposition (Stimmung) durch ein entsprechend geändertes Ausmaß der autonomen Dissimilation bezw. Assimilation voll genügen kann, so findet durch die jeweilige Größe der letzteren diese Disposition ungestörten Ausdruck. Dasselbe Zeichen δ lässt sich dann ebensowohl für die Größe der jeweiligen D-Disposition als für die entsprechende Größe der autonomen Dissimilation gebrauchen, und das Analoge gilt für das Zeichen α. Jede Stufe der Unterwertigkeit ist also durch ein bestimmtes Verhältnis zwischen δ und α d. h. der autonomen D- und A-Disposition charakterisiert. Im Zustande der Mittelwertigkeit ist $\delta = \alpha$, und wenn wir für diesen Zustand beide gleich 1 setzen, so lässt sich jede Stufe der Unterwertigkeit durch einen echten Bruch $\frac{\delta}{\alpha}$ ausdrücken, weil jetzt $\delta < 1$, und $\alpha > 1$ sein muss.

Mit dem Satze, dass mit zunehmender Unterwertigkeit die Disposition der Sehsubstanz zur Assimilierung größer, zur Dissimilation aber kleiner wird, ist noch nichts über das Gesetz ausgesagt, nach welchem die eine zunimmt, wenn die andere abnimmt. Ich habe die nächstliegende und einfachste Annahme gemacht, dass die Disposition zur Assimilation mit der Unterwertigkeit um eben soviel wächst, als die Disposition zur Dissimilation abnimmt, und dass also die Summe ihrer beiden Werte eine konstante ist. Setzen wir diese Konstante gleich 2, so ist $\alpha = 2 - \delta$ und $\delta = 2 - \alpha$. Wer das Bedürfnis fühlt, mit dem Begriffe der Assimilation und Dissimilation schon heute bestimmtere physikalisch-chemische Vorstellungen zu verbinden, wird diese Annahme wohl auch naheliegend finden. Übrigens aber würde eine andere Annahme am Wesen meiner Theorie nichts ändern.

Die mit der Wertigkeit wechselnde D- bezw. A-Disposition der Sehsubstanz lässt sich auch als deren D- bezw. A-Erregbarkeit bezeichnen, und die hier als konstant angenommenen Lebensbedingungen, unter denen die Substanz dissimiliert und assimiliert, lassen sich als ein konstanter, auf dieselbe wirkender innerer Reiz auffassen. Setzt man diesen gleich 1, so ergiebt sich ebenfalls, dass D-Erregbarkeit und autonome Dissimilation gleich zu setzen sind, und ebenso A-Erregbarkeit und autonome Assimilation.

Von der D-Erregbarkeit der Sehsubstanz ist das wechselnde Vermögen des Empfangsapparates der Netzhaut zur Umsetzung von Lichtenergie in einen D-Reiz zu unterscheiden, kurz gesagt, die Anspruchsfähigkeit oder Empfänglichkeit des Sehorgans für das Licht (vgl. § 25).

Jedem Grade der Unterwertigkeit ist also im Vergleich mit dem Zustande der Mittelwertigkeit eine in bestimmtem Maße geminderte D-Erregbarkeit und autonome Dissimilation (δ) und eine in bestimmtem Maße gesteigerte A-Erregbarkeit und autonome Assimilation (α) eigen, und durch das Verhältnis $\delta : \alpha$ dieser beiden Erregbarkeiten ist der Grad der Unterwertigkeit ebenfalls gekennzeichnet. Sobald nun auf die Sehsubstanz ein D-Reiz (r) wirkt, so gesellt sich zur autonomen Dissimilation ein allonomer Zuwuchs, dessen Größe einerseits dem Reiz, andererseits der D-Erregbarkeit proportional und also $= \delta r$ gesetzt werden möge. Somit würde sich für jedes Zeitelement die ganze während der Wirkung eines D-Reizes stattfindende Dissimilation aus der Gleichung $D = \delta + \delta r = \delta (1 + r)$ ergeben, wenn der Stoffwechsel jedes Elementes der Sehsubstanz ganz unabhängig wäre von dem seiner Umgebung, was freilich, wie wir sehen werden, keineswegs der Fall ist.

Da, wie wir annahmen, die Sehsubstanz ihre Assimilation autonomer Weise um so mehr verstärkt, je unterwertiger sie infolge der Wirkung eines D-Reizes geworden ist, und da also der Grad der eben bestehenden Unterwertigkeit durch eine bestimmte Größe der autonomen Assimilation charakterisiert ist, so wird sich die Steigerung der Assimilation schon während der Dauer eines Lichtreizes in dem Maße geltend machen, als sich dabei die Unterwertigkeit entwickelt. Dies bedeutet eine entsprechende Verkleinerung des durch den Reiz bedingten D-Überschusses und also auch der Geschwindigkeit der absteigenden Änderung. So wird also die durch den Lichtreiz gesetzte Alteration selbst zu einem Hemmnis ihres weiteren Fortschreitens, und dies um so mehr, als sich mit der zunehmenden Unterwertigkeit gleichzeitig die D-Erregbarkeit und mit ihr der durch den D-Reiz bedingte Zuwuchs der Dissimilation verkleinert. Hierdurch wird der D-Überschuss noch mehr vermindert und die absteigende Änderung noch mehr verlangsamt. Wir haben also hier ein Beispiel für jenes Vermögen der lebendigen Substanz, welches ich seinerzeit als das der inneren Selbststeuerung oder Selbstregulierung ihres Stoffwechsels

bezeichnet habe. Heute ist der Begriff der Selbststeuerung des Stoffwechsels jedem Biologen geläufig geworden.

Die successive Anpassung des Stoffwechsels der Sehsubstanz an einen konstant wirkenden D-Reiz. Die soeben erörterte Einrichtung, vermöge deren die durch einen andauernden D-Reiz bedingte absteigende Änderung der Sehsubstanz sich in dem Maße, als sie sich entwickelt, selbst verlangsamt, muss schließlich zum völligen Aufhören einer weiteren Änderung führen. Indem nämlich mit zunehmender Unterwertigkeit der Substanz die Dissimilation immer kleiner, die Assimilation immer größer wird, kommt es schließlich dahin, dass $\delta(1 + r) = \alpha$ wird, womit gesagt ist, dass jetzt Assimilation und Dissimilation gleichgroß sind und gleichgroß bleiben, solange der D-Reiz unverändert fortwirkt. Sobald dieser Zustand eines allonomen Gleichgewichts erreicht ist, hat sich also der Stoffwechsel und die Sehsubstanz dem stetig fortwirkenden D-Reize vollkommen adaptiert. Die autonome Assimilation ist jetzt > 1 und die Dissimilation ebenfalls. Hierdurch unterscheidet sich der Zustand des allonomen, unter der Wirkung eines konstanten D-Reizes bestehenden Gleichgewichts, von dem des autonomen Gleichgewichts, bei dem $\alpha = \delta = 1$ ist.

Je stärker der stetig wirkende D-Reiz ist, um so unterwertiger wird die Sehsubstanz werden müssen, ehe diese vollständige Anpassung an den Reiz eintritt. Immer aber wird dabei wieder $D = A$ und die erscheinende Farbe das Mittelgrau sein.

Würde nach erfolgter vollständiger Anpassung an den Reiz r an die Stelle desselben ein schwächerer, aber weiterhin wieder ganz konstant bleibender Reiz treten, so würde, wie leicht zu übersehen ist, sofort eine aufsteigende Änderung der Sehsubstanz beginnen, die Unterwertigkeit derselben sich mindern, ihre A-Erregbarkeit abnehmen, ihre D-Erregbarkeit zunehmen, und dies alles so lange, bis abermals $D = A$ geworden wäre. Wieder wäre jetzt die Substanz und ihr Stoffwechsel an den Reiz vollständig angepasst, aber entsprechend der geringeren Stärke des D-Reizes wäre jetzt die vollständig angepasste Sehsubstanz nicht so stark unterwertig, wie sie es bei der vollständigen Anpassung an den stärkeren Reiz war.

Der vollständigen Anpassung der Sehsubstanz an einen stetig wirkenden D-Reiz entspricht also eine um so tiefere Stufe der Wertigkeit der Substanz, je stärker jener Reiz ist; die dem Zustande vollständiger Anpassung korrelative Farbe aber ist immer wieder das genaue Mittelgrau.

Wollte man die unter dem Einfluss eines anhaltend wirkenden D-Reizes erfolgende Abnahme der D-Erregbarkeit und der Helligkeit der Farbe als die Folge einer sogenannten »Ermüdung« bezeichnen, so müsste man bedenken, dass die durch diese »Ermüdung« bedingte Abnahme der Helligkeit nie weiter gehen könnte, als bis zum erwähnten Mittelgrau, und nie dazu führen könnte,

dass der fragliche Reiz als dunkleres Grau oder gar als Schwarz empfunden würde.

Die vollständige Anpassung der Sehsubstanz an einen stetig wirkenden D-Reiz zeigt uns, wie ausgiebig dieselbe sich vermöge der Selbstregulierung ihres Stoffwechsels vor einer zu weit gehenden Alteration zu schützen vermag, wenn nur die Bedingungen für eine zureichende Assimilierung fortbestehen. Es wird später dargelegt werden, inwieweit die bereits früher kurz geschilderten und dort auf eine Successiv- oder Daueranpassung des Sehorgans zurückgeführten Thatsachen sich aus der soeben theoretisch entwickelten Anpassung der Sehsubstanz an dauernde D-Reize erklären lassen. Doch kann dies erst dann versucht werden, wenn wir den Einfluss der Wechselwirkung der somatischen Sehfeldstellen auf deren Stoffwechsel kennen gelernt haben. Es schien mir methodisch zweckmäßig, dem Leser zunächst ein theoretisches Bild von dem Verhalten einer Sehsubstanz zu geben, deren Stoffwechsel an jeder Stelle unabhängig wäre von dem Stoffwechsel ihrer Umgebung.

§ 24. Die Größe des Stoffwechsels der Sehsubstanz als das somatische Korrelat des Gewichtes der Farbe. Im Vorhergehenden wurde im wesentlichen nur das jeweilige Verhältnis zwischen den beiden Teilprozessen des Stoffwechsels der Sehsubstanz in Betracht gezogen, nicht aber auch die Größe der Assimilation und Dissimilation, welche bei demselben Verhältnis sehr verschieden gedacht werden kann. Soll aber der Stoffwechsel der Sehsubstanz das somatische Korrelat der Farbe als des psychischen Phänomens sein, so muss es auch für die Größe des Stoffwechsels ein psychisches Korrelat geben.

Dass bei demselben Verhältnisse zwischen Dissimilation und Assimilation die Größe beider eine sehr verschiedene sein kann, ist nicht nur von vornherein denkbar, sondern ergiebt sich auch, wie schon aus dem im vorigen Paragraph Erörterten hervorgeht, als eine notwendige Folge des Grundgedankens unserer Hypothese. Die Erwägung nun, dass auch der Größe des jeweiligen Stoffwechsels der Sehsubstanz eine psychische Bedeutung zukommen müsse, eröffnete mir seinerzeit die Möglichkeit, ein Thatsachengebiet, das mir bis dahin einer physiologischen Auffassung ganz unzugänglich schien, einer solchen zu unterwerfen. Die Verschiedenheit der Größe des Stoffwechsels bei sonst gleicher Beschaffenheit desselben lieferte mir nämlich den Schlüssel für ein Rätsel, welches für mich darin lag, dass eine und dieselbe Farbe oder Helligkeit sich mit so verschiedener Energie in unser Bewusstsein zu drängen vermag, je nachdem sie einen Teil des centralen oder des peripheren Sehfeldes bildet, je nachdem sie uns ferner bei offenem oder gedecktem Auge erscheint u. a. m. Von dem leuchtenden Weiß und den schönen bunten Farben der Nachbilder, welche man, sei es

von nur momentanen oder länger auf derselben Stelle verharrenden Netzhautbildern im nachher verfinsterten Auge erhalten kann, wissen die meisten Menschen nichts, obwohl sie dieselben sehen, wenn man ihre Aufmerksamkeit darauf gelenkt hat. Man hat zur Erklärung dieser Thatsache darauf hingewiesen, dass wir, um mit Helmholtz zu sprechen (1, S. 432), »erst lernen müssen, unseren einzelnen Empfindungen die Aufmerksamkeit zuzuwenden, und dies für gewöhnlich nur für die Empfindungen lernen, die uns als Mittel zur Erkenntnis der Außenwelt dienen. Nur zu diesem Zwecke haben die Sinnesempfindungen eine Wichtigkeit für uns im gewöhnlichen Leben, die subjektiven Empfindungen sind meist nur für die wissenschaftliche Untersuchung interessant«. Diese Bemerkungen enthalten freilich viel Richtiges, aber sie passen nicht auf die Farben des peripheren Sehfeldes, denn diese sind keine »subjektiven«, sondern ebenso »objektive« wie die des centralen. Auch wäre es gewiss für den Neugeborenen, der so unendlich viel zu erlernen hat, sehr ersprießlich, wenn von vornherein dafür gesorgt wäre, dass das zur weiteren Erforschung seiner Außenwelt besonders geeignete centrale Netzhautbild sich ihm vorwiegend aufdrängte, und er nicht erst lernen müsste, es aus der Fülle des gleichzeitig Erscheinenden herauszufinden und seine Aufmerksamkeit auf ihm zu sammeln; wenn ferner die allonomen Empfindungen des offenen beleuchteten Auges entsprechend ihrer Bedeutung für seinen Verkehr mit der Außenwelt ihm ganz von selbst leichter und deutlicher ins Bewusstsein treten würden als die autonomen Licht- und Farbenerscheinungen des verfinsterten Auges, obwohl dieselben an Helligkeit und Mannigfaltigkeit so manchen Farben des offenen Auges nicht nachstehen.

Dass die Nachbilder, das gewöhnliche Eigenlicht und andere bei verfinstertem Auge auftretende Phänomene so vielen Menschen unbekannt bleiben, hat man auch aus einer zu geringen »Intensität« d. h. hier Helligkeit derselben zu erklären versucht. Aber die tonfreien Farben solcher Nachbilder gehören, ebenso wie die bei belichteten Augen gesehenen, beiden Hälften der tonfreien Farbenlinie und keineswegs nur der dunkleren Hälfte derselben an, und ihre Helligkeit ist zuweilen eine sehr bedeutende. Auch dass die Farben des peripheren Sehfeldes durchschnittlich viel weniger ins Bewusstsein oder richtiger gesagt ins bewusste Gedächtnis gelangen, als wie die des centralen, kann nicht darauf beruhen, dass sie weniger »intensive« d. h. hier weniger helle Gesichtsempfindungen wären als die letzteren, denn bei Tage ist die durchschnittliche Helligkeit der Farben selbst in der Nähe der Sehfeldgrenze nicht kleiner, und sie sind nicht schwärzlicher als in der Sehfeldmitte. Ebenso können die Grenzen des Sehfeldes nicht dadurch bedingt sein, dass die »Intensität« der Lichtempfindungen hier auf ihren, angeblich dem tiefsten Schwarz entsprechenden Nullpunkt sinkt; denn an der Grenze des Sehfelds und über sie hinaus wird nicht schwarz, sondern überhaupt nicht gesehen.

Die soeben besprochenen Thatsachen sowie viele andere später zu erörternde erklären sich, wie ich meine, aus einem Satze, welchen ich schon im Jahre 1874 (4, § 29) ausgesprochen und als ein »psychophysisches Grundgesetz« bezeichnet habe. Auf den Gesichtssinn angewendet besagt jener Satz, dass die Eindringlichkeit oder Auffälligkeit, welche einer Sehqualität oder Farbe zukommt, unter sonst gleichen — gleich günstigen oder gleich ungünstigen — Bedingungen zukommt, von der Größe des korrelativen Stoffwechsels in der Sehsubstanz abhängig ist.

Die Größe dieses Stoffwechsels bestimmt hiernach das, was ich damals als das Gewicht der Farbe bezeichnet habe, und diesem Gewichte entspricht unter sonst gleichbleibenden Umständen die Energie, mit der sich die Farbe unserem Bewusstsein aufdrängt. Ich sage: unter sonst gleichbleibenden Umständen, denn das Gewicht der Farbe kann nur eine der mannigfachen Bedingungen sein, von deren Gunst oder Ungunst die Stellung abhängt, die eine Farbe des Sehfeldes jeweils in unserem Bewusstsein einnimmt.

Alle Farben, welche wir normaler Weise bei geschlossenen und vor Licht geschützten Augen oder auch offenen Auges im lichtlosen Raume sehen, die grauen, weißen und bunten Farben der unter solchen Umständen erscheinenden Nachbilder sind ihrer Qualität nach dieselben, wie die bei offenen Augen unter der Wirkung des Lichtes entstandenen, aber ihr Gewicht und das Maß des korrelativen Stoffwechsels der Sehsubstanz ist letzterenfalls ein größeres, und auch bei belichtetem Auge kann dieselbe Farbe, je nach den Bedingungen ihres Entstehens, ein verschiedenes Gewicht haben, worauf noch öfters zurückzukommen sein wird.

Für die Einheit der Sehsubstanz bemisst sich die Größe des Stoffwechsels nach der Menge des in der Zeiteinheit von ihr aufgenommenen und abgegebenen Stoffes. Je größer die einer Flächeneinheit des somatischen Sehfeldes entsprechende Menge der Sehsubstanz ist, desto größer ist unter sonst gleichen Umständen der Stoffwechsel. Der größere Reichtum des centralen, somatischen Sehfeldes an Sehsubstanz, im Vergleich mit dem peripheren Sehfelde, bedingt also in ersterem einen durchschnittlich größeren Stoffwechsel und entsprechend größeres Gewicht der Farbe. Dabei kann im excentrischen Sehfelde der Stoffwechsel im Einzelfalle größer und die Farbe gewichtiger sein als im centralen, weil, wie gesagt, die Stoffwechselgröße überdies abhängig ist von der Stärke der wirkenden D-Reize.

Aber noch ein dritter Faktor ist für die Größe des Stoffwechsels mit bestimmend, nämlich die im Vorhergehenden zunächst als völlig konstant angenommenen Stoffwechselbedingungen. Wenn z. B. die normaler Weise stets zureichende Versorgung der Sehsubstanz mit dem zur Assimilierung nötigen Ersatzmaterial eine Störung erfährt und deshalb andauernd gemindert

ist, so wird auch die Assimilation nicht mehr in der normalen Weise stattfinden, und die Wertigkeit der Sehsubstanz so lange abnehmen, bis wieder das durchschnittliche Gleichgewicht zwischen geminderter Assimilation und der infolge schwacher Assimilation ebenfalls geminderten Dissimilation hergestellt ist. Ebenso wie eine mangelhafte Zufuhr von A-Material, könnte irgend welche andere Beeinträchtigung der normalen Assimilation zu einer Herabsetzung der Größe des Stoffwechsels und des Gewichts der korrelativen Farbe führen. Dies wird sich an der Grenze des somatischen Sehfeldes, wo wegen der geringen Menge von Sehsubstanz die Stoffwechselgröße und das Gewicht der Farbe ohnedies schon entsprechend kleiner sind, am ehesten bemerklich machen, und zwar durch eine nach Maßgabe der Störung mehr oder weniger deutliche Einengung der Sehfeldgrenze.

Hiernach erscheint die normale Lage der nach den üblichen Methoden bestimmten Sehfeldgrenzen als wesentlich mit abhängig von der Ungestörtheit der übrigen Assimilationsbedingungen und insbesondere auch von der normalen Zufuhr der Assimilationsstoffe.

Für die Qualität der Farbe, welche von einem bestimmten, durch Licht verursachten D-Reiz an einer Stelle des Sehfelds herbeigeführt wird, ist die dieser Stelle eigene Menge der Sehsubstanz gleichgültig. Denn der D-Zuwuchs, welchen dieser Reiz r in der Sehsubstanz erzeugt, ist stets proportional der autonomen Dissimilation δ, die Größe der Dissimilation also gleich $\delta + \delta r$ und die entstehende Farbe dem Verhältnis $\delta + \delta r : \alpha$ entsprechend. Die Werte von δ und α, d. h. hier die der autonomen Dissimilation und Assimilation aber sind notwendig proportional der Menge der Sehsubstanz, welche der bezüglichen Stelle des somatischen Sehfeldes eigentümlich ist. So oft also an zwei somatischen Sehfeldstellen das Verhältnis zwischen ihrer autonomen Dissimilation und Assimilation das gleiche ist, bewirkt derselbe D-Reiz an beiden Stellen dieselbe Farbe[1]), gleichviel, ob die Menge der Sehsubstanz an beiden Stellen gleich oder beliebig verschieden ist.

Schon im § 9 (Seite 31) wurde darauf hingewiesen, wie die im allgemeinen größere Aufdringlichkeit der helleren Farben die Ansicht begünstigt hat, dass die verschiedenen tonfreien Farben nur verschiedene Intensitätsstufen einer und derselben Sehqualität seien. Diese größere Aufdringlichkeit erklärt sich also nach meiner Auffassung daraus, dass unter sonst gleichen Umständen alle übermittelhellen Farben ein um so größeres Gewicht haben, je heller sie sind, was im VII. Abschnitt noch weiter zu belegen sein wird. Für den nach meiner Ansicht auf die Farbe nicht anwendbaren Begriff der Intensität bietet also das Gewicht der Farben in gewissem Sinne einen Ersatz.

---

1) In § 29 meiner Mitteilungen »zur Lehre vom Lichtsinne« (4) habe ich das, was ich unter Gewicht einer Empfindung verstehe, in einer meines Erachtens zureichend verständlichen Weise auseinandergesetzt. Unter ausdrücklicher

§ 25. Die Bedeutung der Empfangstoffe der Netzhaut. Im Anschluss an Boll's Entdeckung des Sehpurpurs und seine eigenen Untersuchungen über die »Chemie des Sehepithels« und die »photochemische Zersetzung in der sehenden Netzhaut« entwickelte W. Kühne eine »optochemische Hypothese« (20, S. 326). Er erachtete das Sehepithel als Träger photochemisch zersetzlicher Stoffe, welche er als Sehstoffe bezeichnete, deren Zersetzung direkt oder indirekt den eigentlichen Reiz für die nervöse Substanz bedingen sollte. Um der immer wiederkehrenden Verwechslung dieser Sehstoffe mit der Sehsubstanz vorzubeugen, will ich dieselben als Empfangstoffe der Netzhaut benennen. Dass der Sehpurpur ein solcher Empfangstoff sei, nahm Kühne zwar als höchst wahrscheinlich, doch nicht als zwingend bewiesen an, fand aber die Annahme noch überdies vorhandener farbloser Empfangstoffe »unbedingt« erforderlich. Als ich meine Mitteilungen »zur Lehre vom Lichtsinne« veröffentlichte, war der Sehpurpur noch unbekannt, und ich musste mich damals begnügen, mich denen anzuschließen (4, § 27), welche im Gegensatze zu Herschel, Melloni und Seebeck die Wirkung des Lichtes auf die nervöse Substanz des Auges als eine chemische ansahen. Erst Boll's und Kühne's Entdeckungen schufen mir eine Grundlage zu einer weiteren Differenzierung der bis dahin nur summarisch behandelten Anpassung des inneren Auges und die Möglichkeit, neben der Anpassung der Sehsubstanz als einer im strengen Sinne nervösen Substanz eine besondere Anpassung des Empfängers der Netzhaut d. h. der Stäbchen- und Zapfenschicht in Betracht zu ziehen. Denn wenn die Sehzellen besondere Stoffe enthalten, welche vermöge einer teilweisen Zersetzung durch Licht dasselbe erst zu einem Reize für die nervöse Substanz machen, der als ein Dissimilationsreiz den Stoffwechsel der Sehsubstanz beeinflusst,

---

Berufung auf diese Erörterung wies ich in § 27 darauf hin, »dass psychophysische Prozesse von sehr verschiedener Größe dieselbe Empfindung geben können, weil es überall (wo es sich wie damals in § 27 nur um die Art der Empfindung handelt) nicht auf die absolute Größe dieser Prozesse, sondern lediglich auf ihr gegenseitiges Verhältnis ankommt«. Gleichwohl fand ich einst in einer Abhandlung über die Gesichtsempfindungen die Bemerkung, dass durch meine oben citierte Behauptung das eigentliche Wesen des von mir vertretenen Prinzips, nach welchem, um Mach's Worte zu benützen (13, I. S. 320), »gleichen psychischen Prozessen gleiche physische und ungleichen, ungleiche entsprechen sollen« geradezu aufgehoben werde. Der Autor dieses Einwandes hat denselben später wiederholt und endlich neuerdings wieder bemerkt, dass nach meiner Ansicht »die Empfindung nur von dem Verhältnis abhängen solle, in dem die beiden Prozesse (D und A) jeweils verwirklicht sind, während es auf die Intensität beider nicht ankommen soll«. Schließlich ist mir auch von anderer Seite dieser vermeintliche Verstoß gegen die Logik vorgehalten worden.

Nun denke man sich einen Metallgießer, der einem Kunden zwei Stücke Messing von gleicher Legierung, aber verschiedenem Gewicht vorlegt und ihm versichert, beide Stücke seien »dasselbe« Messing: Was würde dieser Mann sagen, falls der Kunde ihm einwendete, diese Behauptung enthalte einen offenbaren Widerspruch, denn das eine Stück wiege zwei, das andere nur ein Pfund.

so wird neben dem specifischen Absorptionsvermögen jener Stoffe auch deren jeweilige Menge für den optischen Reizwert des Lichtes mitbestimmend sein. Würde bei einer anhaltend konstanten und relativ starken Belichtung einer Netzhautstelle mehr von dem Empfangstoffe verbraucht als gleichzeitig gebildet, so müsste der Gehalt der Sehzeilen an diesem Stoffe abnehmen und also ein zur absorbierten Lichtmenge proportionaler Reizwert des Lichtes solange herabgesetzt werden, bis der Verbrauch dem gleichzeitigen Ersatze wieder gleich geworden wäre. Auf diese Weise könnte die Sehsubstanz vor einer zu lange währenden übermäßigen Reizung geschützt werden. Wenn aber dann an die Stelle der starken Belichtung eine andauernd schwache träte, so würde fortan weniger von dem Empfangstoffe zersetzt als gebildet, seine Menge würde wieder zunehmen und der Reizwert des Lichtes sich solange steigern, bis wieder das Gleichgewicht zwischen Verbrauch und Ersatz des Empfangstoffes hergestellt wäre.

Wegen der fortwährenden Bewegungen des Auges wechselt die Beleuchtung der einzelnen Netzhautstellen auch dann unaufhörlich, wenn die Gesamtbeleuchtung des Gesichtsfeldes eine konstante ist. Doch ist dabei für alle Netzhautstellen der Durchschnittswert ihrer wechselnden Beleuchtung beiläufig derselbe, und zwar ist er proportional zur jeweiligen Stärke der konstanten Gesamtbeleuchtung des Gesichtsfeldes. Infolge des beschriebenen Anpassungsvermögens des Empfangsorganes würde nun trotz großen Verschiedenheiten der Gesamtbeleuchtung der Reizwert jenes Durchschnittswertes der Netzhautbeleuchtung für die Sehsubstanz schließlich immer wieder derselbe werden, weil das Empfangsorgan sich für die eben herrschende Beleuchtung des Gesichtsfeldes vollständig adaptiert hätte.

So würde es sich verhalten, wenn die Produktion des Empfangstoffes eine quantitativ konstante wäre. Es würde dann zwar der jeweilige G e h a l t der Sehzellen an solchem Stoffe ein sehr verschiedener und zwar bei anhaltend starker Beleuchtung ein kleiner, bei anhaltend schwacher ein großer sein, aber die Größe des V e r b r a u c h e s wäre nach jedesmaliger Anpassung des Empfängers an die Beleuchtung immer wieder dieselbe. Anders würde es sich verhalten, wenn die Produktion der Empfangstoffe, je nachdem die Netzhaut belichtet oder verfinstert ist, eine quantitativ verschiedene wäre, was große Wahrscheinlichkeit für sich hat. Denn es ist nicht anzunehmen, dass während der Nachtruhe, wobei das Auge stundenlang ganz verfinstert sein kann, die Bildung der Empfangstoffe ungeschwächt fortdauere und dieselben sich proportional zur Dauer der Verfinsterung im Sehepithel anhäufen. Wer noch einen besonderen Beweis dafür verlangen sollte, dass letzteres nicht der Fall ist, der könnte auf die später zu besprechenden Versuche Aubert's und Anderer über den zeitlichen Verlauf der Dunkeladaptation verwiesen werden. Wenn aber die Empfangstoffe sich nur bis zu einer gewissen Grenze anhäuften, während ihre Produktion gleichwohl

ungeschwächt weiter ginge, so müssten sie, sobald eine bestimmte Grenze erreicht ist, im verfinsterten Auge irgendwie in demselben Maße immer wieder zerstört oder abgeführt werden, in welchem sie produziert werden. Es liegt keinerlei Grund vor, dies anzunehmen. Vielmehr wird jeder, der sich die unerschöpfliche Mannigfaltigkeit von Selbstregulierungen der Lebensprozesse und anderer physikalisch-chemischer Prozesse vergegenwärtigt, mit mir wahrscheinlich finden, dass bei anhaltender Finsternis die weitere Bildung und Anhäufung der Empfangstoffe früher oder später aufhört, sei es dass ihre Anhäufung selbst irgendwie zu einem Hindernis für ihre weitere Produktion wird, sei es dass ein während der Belichtung bestehender Anreiz zu ihrer Bildung infolge der Verfinsterung des Auges in Wegfall kommt. Auch wird später eine Thatsache zu besprechen sein, welche es wahrscheinlich macht, dass sich im Sehorgan infolge der Belichtung eine funktionelle Hyperämie entwickelt, wie solche von vielen nicht stetig fungierenden Organen bekannt ist, und dass diese Hyperämie ebenfalls auf nervösem Wege eingeleitet wird. Dies würde in Einklang sein mit der Annahme, dass die Bildung der Empfangstoffe mit in Abhängigkeit steht von der Belichtung der Netzhaut.

Ebensowenig wie der Stand des Wassers in einem Gefäße, welches einen gleichzeitigen Zu- und Abfluss hat, uns Aufschluss über die in der Zeiteinheit zu- und abfließende Wassermenge giebt, ebensowenig können wir aus dem jeweiligen Gehalt des Sehepithels an Empfangstoff das Ausmaß des eben stattfindenden Verbrauches des letzteren ableiten, und wie trotz einem niedrigen Wasserstande ein starker Wasserzufluss deshalb stattfinden kann, weil gleichzeitig ein ebenso starker Abfluss besteht, kann mit einem sehr kleinen Gehalt an Empfangstoff eine relativ starke Produktion desselben verbunden sein, wenn die Stärke der Belichtung einen, der Produktion gleich starken Verbrauch desselben bewirkt.

Ich habe den Eindruck erhalten, als ob diejenigen, welche wegen der schwächeren Rotfärbung der Netzhaut belichtet gewesener Augen annehmen, dass bei Tage weniger Sehpurpur verbraucht werde als während der Dämmerung, nicht beachtet hätten, dass ein geminderter Purpurgehalt des Sehepithels an und für sich gar nichts für einen geminderten Verbrauch desselben beweist. An anderer Stelle wird hierauf zurückzukommen sein.

Schon Kühne sprach von einem »Sehen ohne Sehpurpur«, weil er in der Netzhaut von Fröschen und Kaninchen, welche vor dem Tode längere Zeit in ungewöhnlich lichtstarker Umgebung gelebt hatten, keinen Sehpurpur sehen konnte. Er hat wohl nicht bedacht, dass jede zureichend verdünnte Lösung eines Farbstoffes farblos erscheint, und dass, wenn man den Purpurgehalt des für starke Dämmerung angepassten Empfangsorganes = 1 setzt, derselbe bei einer hundertmal stärkeren Beleuchtung weniger als $^1/_{100}$ zu betragen brauchte, damit beidenfalls dieselbe Lichtmenge absorbiert, gleichviel Sehpurpur zersetzt und die nervöse Substanz der Netzhaut gleichstark gereizt würde.

Der Reizwert einer das Auge treffenden tonfrei wirkenden Strahlung hängt also erstens von der Größe der Pupille, zweitens wahrscheinlich vom Gehalt der belichteten Netzhautstelle an Empfangstoff ab. Der Reizerfolg der Strahlung aber, d. h. der Zuwuchs, den die Dissimilation der Sehsubstanz erfährt, ist nach unserer Annahme einerseits diesem Reizwerte, andererseits der jeweiligen D-Erregbarkeit (δ) der Sehsubstanz direkt proportional. Durch drei ganz verschiedene Mittel zugleich könnte somit dieser D-Zuwuchs an die jeweilige Stärke der Beleuchtung des Gesichtsfeldes successiv angepasst werden, nämlich durch entsprechende Änderung erstens der Pupille, zweitens der Menge eines Empfangstoffes und drittens der D-Erregbarkeit der Sehsubstanz. Hierauf also würde die successive Anpassung des Sehorganes an die Beleuchtung beruhen.

V. Abschnitt.

Die tonfreien Wechselwirkungen der Sehfeldstellen.

§ 26. Vom simultanen Helligkeitskontraste[1]). Wenn ein kleines graues Feld, z. B. ein Papierschnitzel, auf einem weißen Papier dunkler grau, auf einem schwarzen heller grau erscheint, als auf einem gleichgrauen Papier, oder wenn es auf rotem Papier grünlich, auf gelbem bläulich aussieht, so pflegt man solche sogenannte Kontrasterscheinungen als Täuschungen über die »wirkliche« Farbe des Schnitzels zu bezeichnen, während man diejenige Farbe, die es auf gleichgrauem Grunde zeigt, als seine wirkliche Farbe gelten lässt.

Die genauere Beschreibung und die verschiedenen Erklärungen derartiger sogenannter optischer Täuschungen bildeten lange Zeit den ausschließlichen Inhalt der Abhandlungen über den Simultankontrast. Diese Erklärungen aber gründeten sich teils auf die ältere Annahme [Johannes Müller (23), J. Plateau (24), bezw. Th. Fechner (25)], dass die Farbe, welche infolge der Bestrahlung einer Netzhautstelle gesehen wird, nicht allein von der Art und Stärke dieser Bestrahlung, sondern vermöge einer physiologischen Wechselwirkung der Netzhautstellen auch von der Art und Stärke der gleichzeitigen Bestrahlung der Umgebung jener Netzhautstelle abhänge; teils auf eine neuere, insbesondere von Helmholtz vertretene Annahme, dass es sich bei solchen Kontrasterscheinungen nur um Urteilstäuschungen handele, während die »Empfindung« selbst dabei gar nicht beeinflusst werde.

Den Gedanken, dass die Erscheinungen des Simultankontrastes nicht bloß auf »optische Täuschungen« hinauslaufen, sondern der Ausdruck einer

1) Zusammenstellungen der Litteratur finden sich besonders bei J. Plateau (21) und A. Tschermak (22).

wesentlichen Lebenseigenschaft des Sehorganes sind, finde ich besonders bei Plateau und E. Mach betont (13, I), doch haben dieselben diesen Gedanken in anderer Weise durchgeführt, als wie ich es im Folgenden versuchen werde.

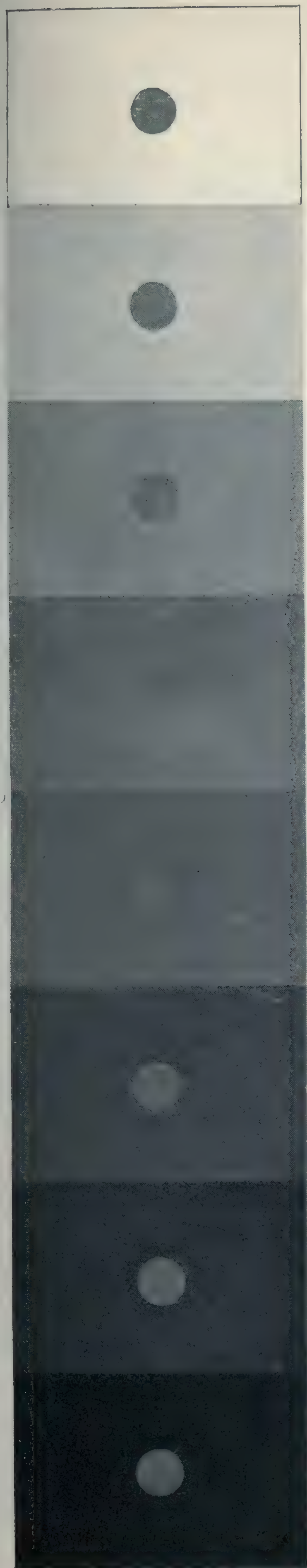
Die wichtigsten Folgen jener Wechselwirkungen äußern sich gar nicht in Kontrasterscheinungen, d. h. in dem vermeintlichen Falschsehen der »wirklichen« Farben der Außendinge. Vielmehr beruht gerade das sogenannte richtige Sehen dieser Farben sehr wesentlich mit auf diesen Wechselwirkungen, und es ist noch viel wichtiger, die letzteren da zu erforschen, wo wir gar nichts von ihnen zu bemerken meinen, als da, wo sie uns als Kontrasterscheinungen auffallen. Der Wechselwirkung der somatischen Sehfeldstellen verdanken wir zu einem wesentlichen Teile sowohl unsere Sehschärfe (vgl. VI. Abschnitt) als auch die Möglichkeit, die Außendinge an ihrer Farbe wieder zu erkennen (vgl. § 6). Da überhaupt die genauere Bekanntschaft mit den Folgen dieser Wechselwirkungen eine der wesentlichsten Grundlagen für das Verständnis der Art unseres Sehens ist, so werde ich dieselben um so mehr etwas eingehender erörtern, als sie in den Lehr- und Handbüchern nur als optische Täuschungen behandelt zu werden pflegen.

Zuerst mögen diejenigen Folgen der Wechselwirkung besprochen werden, welche durchaus den Eindruck von Störungen einer »richtigen« Wahrnehmung der Außendinge machen, und zwar will ich mich hier wieder auf das Gebiet der tonfreien Farben beschränken, wo sich die Wechselwirkung durch den sogenannten Helligkeitskontrast verrät.

Die beiden kleinen grauen Kreisfelder der Fig. 1, Taf. II sind bei gleicher Beleuchtung von gleicher Lichtstärke; dennoch erscheint das auf weißem Grunde liegende auffallend schwärzlicher als das vom Schwarz umgebene. Schlägt man in ein beliebiges Papier zwei runde Löcher, welche nach Größe und Abstand den beiden Kreisfeldern entsprechen, und legt das Papier so auf die Figur, dass von derselben nur die beiden Kreisfelder sichtbar bleiben, so erscheinen dieselben in gleicher Farbe, wie es der Gleichheit ihrer Lichtstärken entspricht.

In Fig. 2, Taf. II haben die beiden grauen Kreisfelder dieselbe Lichtstärke wie in Fig. 1, Taf. II, sie erscheinen jedoch in der ersteren weniger untereinander verschieden als in der letzteren, wo die Verschiedenheit der beiden umschließenden Felder eine viel größere ist als in Fig. 2; denn es gilt die Regel, dass gleich lichtstarke umschlossene Felder um so verschiedener erscheinen, je größer der Unterschied der Lichtstärke der beiden sie umschließenden Felder ist.

Die kleinen Kreisfelder in Fig. 4, Taf. II sind ebenfalls sämtlich von gleichem Remissionsvermögen und daher bei gleicher Beleuchtung von



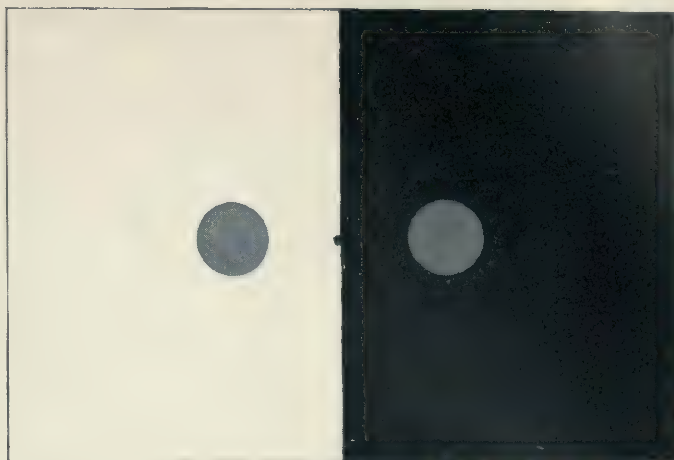


Fig. 1.

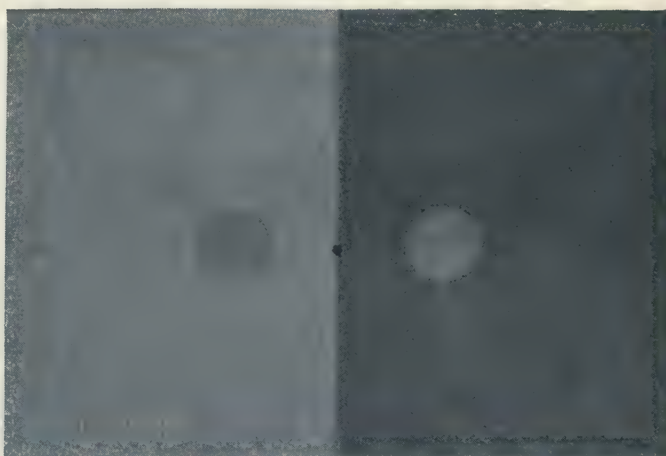


Fig. 2.

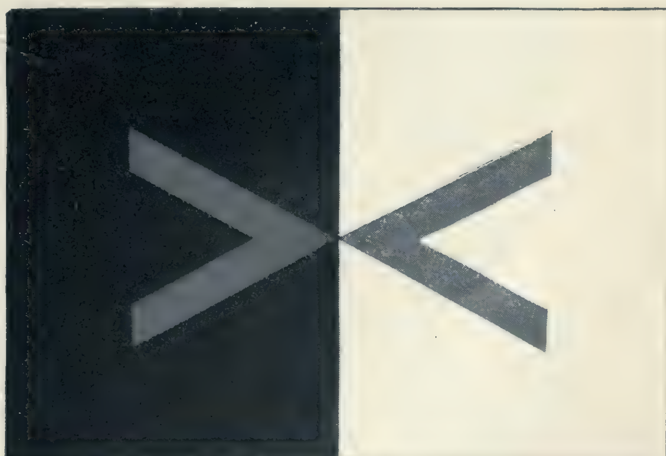


Fig. 3.

Fig. 4.

Verlag von Wilhelm Engelmann in Leipzig.

derselben Lichtstärke. Man sieht hier, wie in der Richtung von unten nach oben die Schwärzlichkeit, in der entgegengesetzten Richtung die Weißlichkeit der Kreisfelder zunehmend größer wird, und wie auffallend der Helligkeitsunterschied zwischen dem untersten und dem obersten Kreisfelde ist.

Während in den soeben erwähnten Figuren die beiden zu vergleichenden grauen Felder erheblich von einander entfernt sind, berühren sich in Fig. 3, Taf. II die beiden umschlossenen, hier hakenförmigen und ebenfalls gleich lichtstarken Felder mit ihren Spitzen; gleichwohl erscheinen sie ebenfalls sehr verschieden.

Man kann sich die kleinen grauen Felder in beliebiger Form aus mattem grauen Papier herstellen und sie auf einen möglichst großen, zur einen Hälfte weißen oder hellgrauen, zur anderen schwarzen oder dunkelgrauen Grund legen; doch hat dies den störenden Übelstand, dass sie bei seitlicher Beleuchtung einen helleren bezw. dunkleren Saum zeigen und nicht als integrierende Bestandteile der übrigen Fläche, sondern als gesonderte Objekte erscheinen. Es ist deshalb zweckmäßig, durch passende Brillengläser dafür zu sorgen, dass man nicht für die Entfernung der Felder akkommodieren kann. Dadurch werden ihre Umrisse verwaschen, und zugleich verschwindet das etwa vorhandene Korn der Papiere.

Die Figuren auf Taf. II zeigen bereits, in wie hohem Grade die Helligkeit eines kleinen Feldes mit abhängt von der Helligkeit seiner Umgebung; doch lässt sich sogar ein kleines weißes Feld ohne Änderung seiner Lichtstärke durch bloße Änderung der Lichtstärke der gesamten Umgebung in ein schwarzes, und umgekehrt ein schwarzes in ein weißes verwandeln. Man schlage in der Mitte eines ganz undurchscheinenden weißen Kartenpapieres von etwa 30 cm im Geviert ein rundes Loch von beiläufig 8 mm Durchmesser und halte es vor sich, während man bei hellem Tage mit dem Rücken am Fenster steht und nach einer 5—6 m entfernten und dementsprechend schlechter beleuchteten weißen Wand oder einen an der Wand befestigten weißen Schirm blickt, von denen also nur ein kleiner Teil durch das Loch sichtbar ist. Hält man zugleich dicht an das Auge eine beiläufig 25 cm lange, mit schwarzem Samt oder Wollpapier ausgekleidete Röhre, welche am anderen Ende eine ebenfalls mit Samt belegte Manschette trägt, und drückt das Kartenpapier im Umkreise des Loches dicht an diese Manschette, so erscheint das Loch weiß; sobald man aber die Röhre entfernt, erscheint es schwarz. Dieser Farbenwechsel ist ein außerordentlich überraschender. Der Einfluss der Pupillenänderung lässt sich durch ein in der Nähe des Augenendes der Röhre eingesetztes Diaphragma ausschließen, dessen Öffnung nur 2 mm im Durchmesser hat.

Überhaupt lässt sich sagen, dass bei Tage ein kleines Feld bei passender konstanter Lichtstärke jede zwischen einem nicht allzutiefen Schwarz und einem ziemlich reinen Weiß liegende tonfreie Farbe annehmen kann,

je nachdem seine Umgebung mehr oder weniger lichtstark ist. Mit wachsender Lichtstärke der Umgebung ändert sich in der Farbe des kleinen Feldes das Verhältnis der Schwärze zur Weiße immer mehr zu Gunsten der Schwärze, mit abnehmender Lichtstärke der Umgebung zu Gunsten der Weiße.

Die soeben besprochenen Thatsachen pflegt man zwar meistens als Erscheinungen des simultanen Helligkeitskontrastes zu bezeichnen, bei der gewöhnlichen Art des Sehens aber, wobei der Blick zwanglos umher springt, hat dieser Kontrast eine doppelte Ursache. Erstens wird ein Netzhautbild von gleichbleibender Lichtstärke, wenn es infolge einer Augenbewegung auf Netzhautstellen geschoben wird, welche soeben schwächer belichtet waren, weißlicher oder minder schwärzlich gesehen, als wenn es auf Netzhautstellen übertritt, welche zuvor stärker belichtet waren: die unter diese Regel fallenden Erscheinungen gehören zu denen des successiven Kontrastes oder, wie ich kürzer sagen will, des Nachkontrastes. Zweitens wird ein auf derselben Netzhautstelle verharrendes Bild, wenn es von einem lichtschwächeren umschlossen ist, weißlicher oder minder schwärzlich gesehen, als wenn es von einem lichtstärkeren umgeben ist: die hierher gehörigen Erscheinungen sind solche des reinen Nebenkontrastes d. h. des simultanen Helligkeitskontrastes im engeren Sinne.

Die oben besprochenen Kontrasterscheinungen sind also, wenn man wie gewöhnlich mit bewegtem Blicke beobachtet, teils durch Nachkontrast, teils durch Nebenkontrast bedingt; sie sind Erscheinungen des gemischten Kontrastes.

Zunächst gilt es, den Nebenkontrast, welcher uns jetzt allein beschäftigen soll, streng gesondert vom Nachkontraste zu untersuchen, wie dies besonders Helmholtz wenigstens teilweise durchführte (s. I, S. 392). Streng lässt sich dem dadurch entsprechen, dass die ganze Fläche, auf der sich die Kontrasterscheinung zeigen soll, erst dann sichtbar gemacht wird, wenn die Augen bereits eine feste Lage angenommen haben, welche dann während der im allgemeinen nur kurz (1—2 Sekunden) zu bemessenden Beobachtungszeit unverändert beizubehalten ist. Ein länger fortgesetztes Beobachten mit festgehaltenem Blicke vermag das Ergebnis wesentlich zu ändern.

Man schiebe über die Figur 1 (Taf. II) von rechts und links je ein graues Blatt bis an die Grenzlinie zwischen dem Schwarz und Weiß, so dass diese unter sich ganz gleichen Deckblätter längs der Grenzlinie zusammenstoßen, und mache am Rande des einen Deckblattes einen kleinen Ausschnitt an der Stelle, unter der sich die auf der Grenzlinie der Figur angebrachte schwarze Marke befindet. Fixiert man einige Zeit mit einem oder beiden Augen die letztere und zieht sodann bei unveränderter Augenstellung die beiden Deckblätter mit mäßiger Geschwindigkeit nach rechts

und links zur Seite, so sieht man sofort die beiden grauen Kreisfelder in verschiedener Farbe, wenn auch nicht in demselben Maße, wie bei gewöhnlicher Betrachtung. Auf diese Weise ist dafür gesorgt, dass die Netzhautstellen, auf welche die Bilder der Kreisfelder fallen, zuvor hinreichend lange in ganz gleicher Weise belichtet waren, und ein Nachkontrast infolge von Augenbewegungen ist ausgeschlossen. Im Folgenden wird stets eine vor Einmischung des Nachkontrastes möglichst schützende Versuchsweise vorausgesetzt.

Der Blickpunkt ist mitten zwischen die zu vergleichenden Felder zu verlegen, damit sich die letzteren auf möglichst gleichwertigen Netzhautstellen abbilden.

Aubert und E. Mach haben bei einzelnen Versuchen den Einfluss der Blickbewegung dadurch ausgeschlossen, dass sie die Beobachtungsfläche nur momentan

Fig. 18.



Fig. 19.



durch einen starken elektrischen Funken beleuchteten. Ich selbst habe vielfach einen sogenannten Momentverschluss der Photographen benutzt, nachdem ich für besonders starke Beleuchtung der Beobachtungsfläche gesorgt hatte. Beide Methoden gestatten jedoch nur eine sehr begrenzte Verwendung. Vorzügliche Dienste leistet die folgende, auch nur in besonderen Fällen anwendbare Methode: Man befestigt die Kontrastfigur auf einem schwarzen Karton, durchsticht beide an dem zur Fixierung bestimmten Punkte mit einer feinen Nadel und beleuchtet das Loch von hinten durch eine sehr schwache Lichtquelle. Empfängt nun die Kontrastfigur ihre Beleuchtung ausschließlich durch eine Öffnung im Fensterladen oder durch eine Lampe, die sich leicht verdecken lassen, so fixiert man zunächst bei Ausschluss der Beleuchtung das allein leuchtende Loch und giebt dann plötzlich die Beleuchtung wieder frei. Andere Methoden zur Ausschließung des Nachkontrastes werden gelegentlich zur Sprache kommen.

Der zweiten wichtigen Bedingung, dass die kleinen Felder als integrierende Teile der übrigen Fläche erscheinen, lässt sich in einzelnen Fällen mit Hilfe des Farbenkreisels genügen. Fig. 18 ist ein möglichst treues

Abbild[1]) einer rotierenden Kreiselscheibe, auf welcher der schmale grauweiße Ring in der äußeren schwarzen Zone und der dunkler graue in der inneren weißen Zone von gleichem Kreiselwert sind. Fig. 19 stellt die entsprechende unbewegte Kreiselscheibe dar.

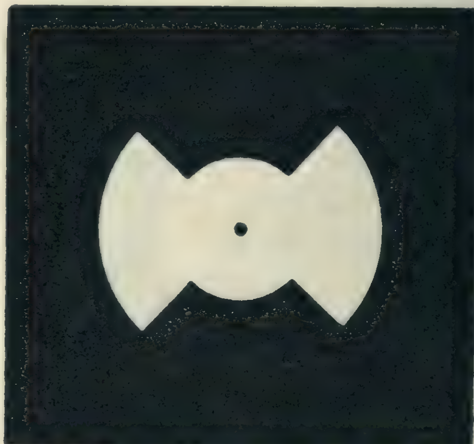
Um den Nachkontrast auszuschließen, bringt man vor der Scheibe einen, von einem Träger gehaltenen feinen Draht an, dessen Spitze, wenn man sie mit einem Auge fixiert, einen Punkt der Grenzlinie der weißen und schwarzen Zone deckt, und hält hinter diesen Draht ein steifes graues Blatt so lange, bis der Kreisel die nötige Geschwindigkeit erreicht hat. Dann zieht man das Blatt weg, während man das Drahtende weiter fixiert.

Eine zweckmäßige Herstellungsweise solcher Kreiselscheiben ist folgende: Auf eine größere schwarze Scheibe wird eine kleinere weiße gelegt, nachdem aus beiden je zwei Fenster in Form eines schmalen Ringsektors von 90° ausgeschnitten sind, wie dies Fig. 19 zeigt. Unter der größeren schwarzen Scheibe

Fig. 20.



Fig. 21.



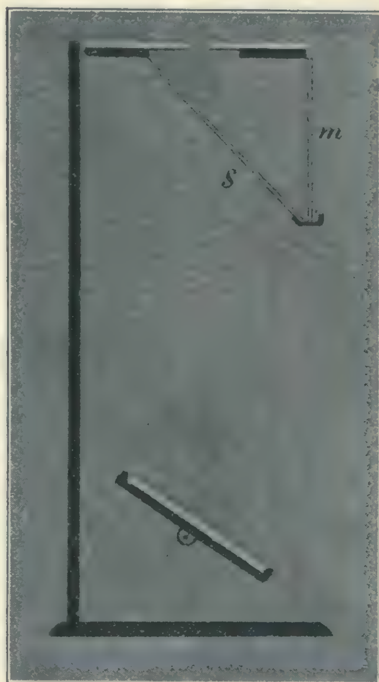
liegt eine gleichgroße weiße und zwischen dieser und der schwarzen noch eine große schwarze von der in Fig. 20 dargestellten Form. Durch passende Lagerung der letzteren kann man die weiß erscheinenden Ringsektoren der erstgenannten Scheibe beliebig verkleinern. Ebenso lassen sich die schwarz erscheinenden Ringsektoren der kleinen weißen Scheibe durch eine untergelegte kleine weiße Scheibe von der Form der Fig. 21 beliebig kürzen. Man kann in dieser Weise sowohl auf der weißen als auf der schwarzen Zone der rotierenden Scheibe graue Ringe von einer innerhalb gewisser Grenzen beliebigen Helligkeit herstellen und zu jedem Grau des Ringes der weißen Zone einen ihm gleichscheinenden für die schwarze Zone finden. Als ich z. B. an einem hellen Tage die schwarzen Ringsektoren in der weißen Zone mit 90° eingestellt hatte, musste ich die weißen in der schwarzen Zone bis auf 9° reduzieren, um für das unbewegte Auge gleiche Helligkeit beider Ringe zu erzielen. Hierbei war der Kreiselwert des einen Ringes beiläufig siebenmal größer als der des anderen.

---

1) Über das Photographieren rotierender Kreiselscheiben vergleiche E. Mach (13, I. S. 306), welcher dasselbe zuerst vorgenommen hat.

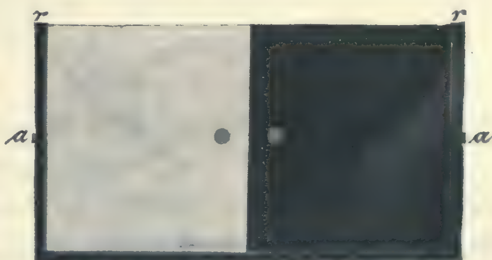
§ 27. Ein Apparat zur Untersuchung des simultanen Helligkeitskontrastes. Um sowohl die Lichtstärken zweier miteinander zu vergleichender umschlossener Felder als auch die Lichtstärken der sie umschließenden Flächen innerhalb ziemlich weiter Grenzen leicht verändern zu können, habe ich mich vielfach einer schon wiederholt erwähnten Methode bedient, die sich kurz als die Lochmethode bezeichnen lässt. Fig. 22 stellt schematisch einen Vertikalschnitt durch einen Apparat dar, welcher eine vielseitige Anwendung dieser Methode gestattet.

Fig. 22.



Man denke sich einen offenen, innen mattgeschwärzten Kasten von 60 cm Länge, 36 cm Breite und 24 cm Tiefe, der auf die eine kürzere Seitenwand gestellt ist. Die dabei nach oben liegende Wand ist durch einen Rahmen (*rr* Fig. 23) ersetzt, auf dem gewöhnlich ein halb mit mattschwarzem, halb mit mattweißem Papier bedeckter steifer, auf seiner Unterseite geschwärzter Karton liegt. In der Nähe der Grenzlinie der schwarzen und der weißen Hälfte ist jederseits ein rundes Loch von beiläufig 12 mm Durchmesser geschlagen, wie dies Fig. 23 versinnlicht. Diese Löcher sind im Karton ein klein wenig größer als in dem aufliegenden weißen und schwarzen Papier. Aus letzteren müssen sie mit einem sehr scharfen Locheisen so ausgeschlagen werden, dass ihr Rand weder eingedrückt noch aufgeworfen ist. Der Beobachter steht hinter dem in passender Höhe aufgestellten Kasten und blickt von oben auf denselben herab, so dass für ihn die schwarze und weiße Hälfte der oberen Fläche nach rechts und links liegen. Etwas oberhalb der Unterfläche des Kastens befindet sich in demselben rechts und links je eine, an einer horizontalen Achse befestigte dünne Metallplatte, auf welche mit weißem oder grauem Papier überzogene Glastafeln aufgelegt werden. Das Abgleiten derselben bei schräger Stellung der sie tragenden Metallplatte ist durch vorspringende Ränder der letzteren verhindert. Diese beiden Tragplatten berühren sich fast in der Mitte des Kastens. Wenn nötig können sie durch einen kleinen Riegel an der Unter-

Fig. 23.



fläche so verkoppelt werden, dass sie gemeinschaftlich wie eine einfache Platte von doppelter Größe um die horizontale Achse drehbar sind. Damit der Beobachter die Lage der Platten ändern kann, ohne sich bücken zu müssen, trägt die Achse einer jeden außen eine Rolle, welche mittels Schnurlauf durch eine zweite, am oberen Teile des Kastens befindliche Rolle bewegt werden kann, wie dies die in Fig. 24 skizzierte Seitenfläche des Kastens veranschaulicht.

Fig. 24.

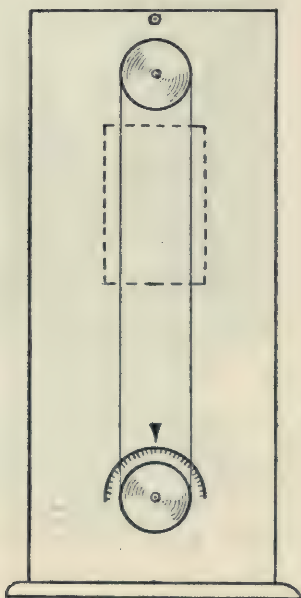


Fig. 25.



Von den auf den Tragplatten liegenden Tafeln empfangen die beiden Löcher für den Beobachter ihr Licht, so dass sie ihm, besonders bei unvollkommener Akkommodation, als graue bezw. weiße oder schwarze runde Flecke auf der oberen schwarzen bezw. weißen Fläche erscheinen. Die Stärke der Beleuchtung jedes Loches lässt sich durch Änderung der Neigung der entsprechenden unteren Tafel zur Einfallsrichtung des Himmelslichtes innerhalb weiter Grenzen variieren.

Befindet sich die Nasenwurzel in passender Höhe senkrecht über dem Mittelpunkte der oberen Fläche des Apparates, und fixiert man diesen

Punkt, so ist bei zureichendem Abstande der beiden Löcher von einander für beide Augen das rechtseitige Loch ausschließlich von der rechtseitigen, das linke ausschließlich von der linkseitigen unteren Tafel beleuchtet, wie dies Fig. 25 veranschaulicht. Beobachtet man mit nur einem Auge, so dürfen die beiden Löcher einander beliebig nahe sein; das Auge soll sich dann senkrecht über dem Mittelpunkte der oberen Fläche befinden. Ein Kopfhalter sichert die passende Augenlage. Der Blickpunkt soll in der Mitte zwischen den beiden Löchern liegen, so dass beide indirekt gesehen werden.

Für besondere Versuche kann im Apparat ein unter 45° zum oberen Karton geneigtes Spiegelglas (*s*) und zugleich vor den obersten Teil der offenen Seite des Apparates eine matte Glastafel (*m*) so angebracht werden, wie dies Fig. 22 zeigt. Das durch das Mattglas eindringende Licht wird an dem Spiegelglase reflektiert und gesellt sich für das Auge des Beobachters zu dem von den unteren Papierflächen kommenden Lichte, so dass beide Löcher einen gleich großen Zuwuchs zu ihrer Lichtstärke erhalten.

Bei allen Versuchen wird gleiche Dauer der Beobachtungszeit, z. B. eine Sekunde, und zwischen je zwei Beobachtungen eine so lange Pause vorausgesetzt, dass alle Nachwirkungen des vorhergegangenen Versuchs verschwunden sind. Die Einmischung des durch Augenbewegungen bedingten Nachkontrastes lässt sich durch Benutzung von Deckblättern in der oben (S. 118) beschriebenen Weise ausschließen. Es empfiehlt sich, durch passende Brillengläser dafür zu sorgen, dass man für die Löcher nicht genau akkommodieren kann. Von den sehr mannigfaltigen Versuchen, die sich an diesem Apparate behufs einer vorläufigen Orientierung über die Regeln des Helligkeitskontrastes anstellen lassen, seien nur die folgenden erwähnt.

I. Sind die beiden, zunächst horizontal liegenden Tragplatten mit zwei ganz gleichen z. B. weißgrauen Tafeln belegt, so erscheinen die beiden Löcher trotz der Gleichheit ihrer Lichtstärke verschieden, man kann sie aber gleich erscheinen machen, wenn man entweder der, dem dunkler erscheinenden Loche zugehörigen Tafel eine entsprechend günstigere Neigung zum einfallenden Lichte giebt, oder der anderen Tafel eine entsprechend ungünstigere.

Hat man die beiden Tragplatten in dieselbe Ebene gebracht und verkoppelt, unter das Loch im Weiß ein hellgraues, unter das Loch im Schwarz ein dunkelgraues Papier aufgelegt, so können bei passender Wahl der beiden Papiere die beiden Löcher trotz der großen Verschiedenheit ihrer Lichtstärken ganz gleich erscheinen. In der Verschiedenheit ihres Kreiselwertes hat man eine Art Maß für die Stärke der Kontrastwirkung.

II. Die eine Hälfte der oberen Fläche bestehe aus weißem, die andere aus schwarzgrauem Papier, und den Löchern habe man durch passende Wahl und Lage der unteren Papierflächen eine beiderseits gleiche graue Farbe gegeben. Mindert man dann durch gleichmäßige Beschattung beider

Hälften der oberen Fläche die Lichtstärken derselben in demselben Verhältnis, so erscheint nachher das Loch im Weiß heller als das Loch im Dunkelgrau. Macht man die Löcher durch Drehung der diesem helleren Loche entsprechenden unteren Tafel wieder gleich, so erscheint nach Wiederaufhebung der Beschattung dieses Loch dunkler als das andere. Eine erhebliche Änderung der Gesamtbeleuchtung der Netzhaut lässt sich dadurch vermeiden, dass man nur die nähere Umgebung der beiden Löcher mit Hilfe eines kleinen, an einem Drahte befestigten Papierquadrates gleichstark beschattet.

Dieser Versuch liefert ein Beispiel dafür, dass die Gleichfarbigkeit (gleiche Helligkeit oder Dunkelheit) der beiden verschieden lichtstarken umschlossenen Felder nicht lediglich an ein bestimmtes Verhältnis der Lichtstärken der umschließenden Felder gebunden ist, sondern bei gegebenem Verhältnis dieser Lichtstärken auch eine bestimmte absolute Größe derselben voraussetzt.

III. Nachdem in der oben beschriebenen Weise das Spiegelglas und das Mattglas im Apparate angebracht worden sind, mindert man zunächst das durch das Mattglas eindringende Licht durch Vorsetzen eines passend ausgewählten möglichst tonfreien Rauchglases von der Größe des Mattglases. Die obere Papierfläche sei zur einen Hälfte schwarz, zur anderen weiß. Giebt man nun den beiden Löchern durch passende Wahl und Lage der unteren Tafeln eine beiderseits gleiche graue Farbe und hält dann von dem Mattglas alles Licht durch einen schwarzen Karton ab, so wird die Lichtstärke beider Löcher um denselben Betrag vermindert. Das Loch im Schwarz erscheint nun dunkler als das Loch im Weiß. Macht man beide Löcher durch passende Drehung der, dem Loch im Schwarz entsprechenden unteren Papierfläche wieder gleich und entfernt dann den das Mattglas deckenden Karton, so erhalten beide Löcher einen gleich großen Lichtzuwuchs. Nun erscheint das Loch im Schwarz heller als das Loch im Weiß.

Erscheinen also zwei umschlossene Felder, deren umschließende verschiedene Lichtstärken haben, gleich hell, und erteilt man sodann den beiden umschlossenen denselben Lichtzuwuchs, so werden sie ungleich und zwar zeigt das in der lichtstarken Umgebung liegende einen kleineren Helligkeitszuwuchs als das andere. Dementsprechend ist, wenn beide umschlossene Felder denselben Helligkeitszuwuchs erhalten sollen, für das in der lichtstarken Umgebung liegende ein größerer Lichtzuwuchs erforderlich, als für das Feld mit lichtschwacher Umgebung. Dieser Versuch zeigt, dass bei gegebenen Lichtstärken der umschließenden Felder das Gleicherscheinen der beiden umschlossenen nicht an eine bestimmte Lichtstärkenverschiedenheit der letzteren gebunden ist, sondern dass es auch auf die absoluten Größen ihrer Lichtstärken mit ankommt.

§ 28. Eine wichtige Folgerung aus den beschriebenen Kontrastversuchen. Die bisher besprochenen Kontrasterscheinungen lehrten, dass ein umschlossenes Feld bei derselben Lichtstärke durch jede Steigerung der Lichtstärke seiner Umgebung dunkler, durch jede Minderung derselben heller gemacht werden kann.

Dementsprechend sahen wir, dass, um zwei umschlossenen Feldern, deren umschließende verschieden lichtstark sind, dieselbe Helligkeit zu geben, für das in lichtstärkerer Umgebung liegende eine größere Lichtstärke erforderlich ist, als für das in lichtschwächerer Umgebung befindliche; und wenn wir dann den beiden gleich erscheinenden Feldern einen gleich großen positiven bezw. negativen Helligkeitszuwuchs erteilen wollten, so musste der positive bezw. negative Zuwuchs der Lichtstärke für das in der lichtstärkeren Umgebung liegende Feld größer sein als für das andere. Kurzum die Erhellbarkeit des umschlossenen Feldes erwies sich als eine Funktion der Erhellung seiner Umgebung.

In allen diesen Fällen hatte das umschlossene Feld eine andere Lichtstärke als das umschließende, und zwar war bald das erstere, bald das letztere das lichtstärkere. Es ist jetzt noch der besondere Fall zu erwägen, in welchem beide Felder zunächst dieselbe Lichtstärke haben und zusammen als eine Fläche von überall gleicher Helligkeit erscheinen. Jeder beliebige, innerhalb einer solchen Fläche liegende Einzelteil derselben lässt sich als ein umschlossenes und die übrige Fläche als das umschließende Feld ansehen und steht also unter dem, seine Helligkeit mindernden Einflusse der Lichtstärke dieses umschließenden Feldes, welche hier gleich groß ist wie seine eigene. Infolgedessen wird er minder hell erscheinen, als er erscheinen würde, wenn seine Umgebung eine kleinere oder gar keine Lichtstärke besäße. Da dies von allen Einzelteilen der Fläche gilt, so wird die ganze Fläche minder hell erscheinen, als ohne die gegenseitige verdunkelnde Wirkung ihrer Einzelteile der Fall sein würde.

So führen uns also die beschriebenen Thatsachen zu der Folgerung, dass eine gegenseitige Beeinflussung nicht bloß zwischen Feldern von verschiedener Lichtstärke besteht, sondern auch zwischen solchen von gleicher Lichtstärke und entsprechend gleicher Helligkeit, in Fällen also, wo von einem Kontraste gar nicht gesprochen werden kann, da der Begriff des Kontrastes das Vorhandensein eines Unterschiedes in sich schließt. Das Folgende wird weitere Beweise hierfür bringen.

Die beschriebenen Erscheinungen des simultanen Helligkeitskontrastes haben die Vermutung angeregt, dass die durch Belichtung einer Netzhautstelle bewirkte »Erregung« durch die gleichzeitige Belichtung ihrer Umgebung irgendwie und

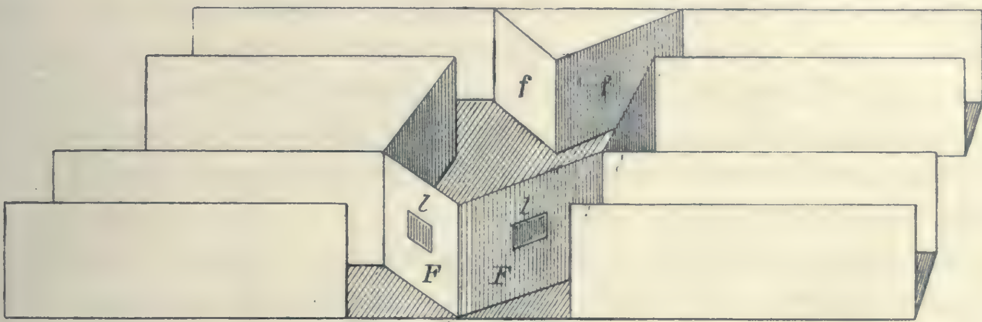
irgendwo im nervösen Apparat teilweise gehemmt, unterdrückt, aufgehoben werde oder wie sonst man es ausdrücken will. Es ist sogar daran gedacht worden, auf diese Weise zu erklären, warum eine bestimmte z. B. ebenmerkliche Steigerung der Helligkeit einer belichteten Fläche einen um so größeren Lichtzuwuchs erfordert, je größer die Lichtstärke der Fläche schon ist (sogenanntes Weber'sches Gesetz). Wenn aber durch die hemmende Wirkung, welche die einzelnen Teile einer gleichmäßig belichteten Fläche gegenseitig auf einander ausüben, ein um so größerer Teil der direkten Lichtwirkung aufgehoben würde, je lichtstärker die Fläche ist, so wäre daraus noch nicht erklärt, warum nicht zu einem ebenmerklichen Zuwuchs der »Erregung« bei jedem beliebigen schon vorhandenen Ausmaße derselben immer derselbe Lichtzuwuchs genügen sollte. Von zwei antagonistischen Kräften könnte der Überschuss der größeren ganz unabhängig davon zur Wirkung kommen, wie groß im übrigen die beiden Kräfte sind. Wüchse die hemmende Kraft, mit welcher die Einzelteile der Fläche aufeinander wirken, z. B. proportional mit der Stärke ihrer Belichtung, so würde dies bezüglich der »Erregung« nur ebensoviel bedeuten, wie wenn diese Belichtung stets um denselben Bruchteil ihrer Stärke vermindert würde; der nicht aufgehobene Rest der Lichtwirkung würde also der Lichtstärke proportional sein, und gleichen Zuwüchsen der Lichtstärken im Netzhautbilde würden immer gleiche Zuwüchse der Erregungen entsprechen. Warum können solche gleiche Erregungszuwüchse nicht auch gleiche Helligkeitszuwüchse bewirken? Was zu erklären war, bleibt also nach wie vor unerklärt.

§ 29. Messende Versuche mittels Vergleichung umschlossener Felder. Im Vorhergehenden wurde bereits beiläufig erwähnt, wie man für die Wirkung des Simultankontrastes eine Art Maß dadurch zu gewinnen vermag, dass man dieselbe durch eine entgegengesetzt wirkende Änderung einer Lichtstärke wieder aufhebt. Sind also zwei Felder gleicher Lichtstärke durch Simultankontrast ungleich hell geworden, so kann man entweder durch Steigerung der Lichtstärke des dunkleren oder durch Minderung der Lichtstärke des helleren beide Felder wieder gleich hell bezw. gleich dunkel machen; der positive oder negative Zuwuchs an Lichtstärke, welcher dazu erfordert wird, dient als Maß der Kontrastwirkung. Ganz abgesehen davon, dass die Mittel zur Herstellung messbarer Lichtstärken und deren Änderung sehr verschiedener Art sein können, stehen auch im übrigen so viele verschiedene Wege zu derartigen Untersuchungen offen, dass selbst eine ganz kurze Skizzierung derselben zu viel Raum fordern würde. Es sei nur daran erinnert, wie groß die Zahl der variablen Bedingungen ist, welche das Ergebnis beeinflussen. Die Größe, Form und gegenseitige Lage der Lichtfelder, der Ort ihrer Bilder auf der Netzhaut, die Beleuchtung der übrigen Netzhaut, der Anpassungszustand des Auges im Momente des Sichtbarwerdens der Felder, die Dauer der einzelnen Beobachtung: dies alles beeinflusst das Ergebnis dieser Versuche, welche überdies an die Aufmerksamkeit, Übung und Objektivität des Beobachters große Anforderungen stellen. Ich begnüge mich mit der kurzen Beschreibung der großen messenden

Versuchsreihe von HESS und PRETORI (26), meines Wissens der einzigen bisher veröffentlichten[1]).

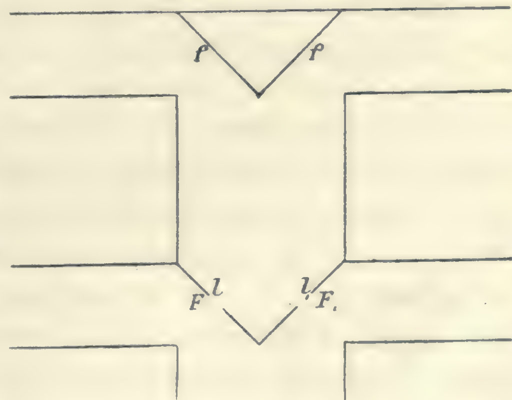
Zur Durchführung größerer messender Versuchsreihen ist eine Methode erforderlich, welche gestattet, die Lichtstärken sowohl der beiden größeren dicht aneinander grenzenden umschließenden Felder als die der beiden

Fig. 26.



kleineren umschlossenen unabhängig von einander und innerhalb weiter Grenzen messbar zu variieren. Hierzu eignet sich eine von mir entworfene Vorrichtung, bei welcher die Lochmethode mit einer alten photometrischen Methode kombiniert wurde. An einem solchen in großem Maßstabe hergestellten Apparate haben HESS und PRETORI ihre Versuche durchgeführt. Als umschließende Felder dienen zwei ebene, vertikal aufgestellte, durch brennendes Magnesium angeweißte 10 cm hohe Flächen F, F (Fig. 26 und 27), welche unter einem Winkel von 90° zusammenstoßen und von zwei seitlichen, in mehr als 4 m langen Tunneln verschiebbaren Lichtquellen beleuchtet werden. In jeder dieser Flächen ist ein als umschlossenes Feld dienendes viereckiges Loch (l, l) von 1 cm Höhe, durch welche Löcher man auf ein zweites Paar ebenfalls

Fig. 27.



angeweißter und unter 90° zusammenstoßender Flächen (f, f) sieht. Dies zweite Flächenpaar ist undurchbrochen, seine Flächen sind parallel zu den anderen, und ebenfalls durch je eine besondere verschiebbare Lichtquelle beleuchtet. Die beiden vorderen rechtwinklig zusammenstoßenden Flächen erscheinen dem 50 cm entfernten Auge des Beobachters als zwei

1) Die messenden Kontrastversuche von A. LEHMANN (9) und von EBBINGHAUS (10) betreffen den gemischten, nicht den reinen Simultankontrast.

in derselben Vertikalebene befindliche Quadrate, und in der Mitte jedes Quadrates ist, wenn die hinteren Flächen andere Lichtstärken haben als die vorderen, das bezügliche Loch als ein scharf begrenztes kleines quadratisches Feld sichtbar, das in der Ebene der großen Quadrate zu liegen scheint. Zu jeder der vier Flächen kann ausschließlich nur das Licht der für sie bestimmten Lichtquelle gelangen. Der ganze Versuchsraum ist verfinstert und insbesondere auch das Auge des Beobachters in den zureichend langen Pausen zwischen den einzelnen, je eine Sekunde währenden Beobachtungen. Auf die ausführliche Beschreibung des Apparates und der Vorsichtsmaßregeln zur Verhütung jeder Einmischung des Successivkontrastes u. s. w. kann hier nur verwiesen werden. Die Beleuchtungsintensität konnte zwischen 1 und 5000 variiert werden, wobei die benutzte Einheit = 0,12 der Hefner-Alteneck'schen Lichteinheit war.

Bei jeder einzelnen Versuchsreihe wurde zunächst beiden umschließenden Flächen gleiche Lichtstärke und beiden umschlossenen ebenfalls gleiche, aber von jener verschiedene Lichtstärke gegeben; dann wurde die Beleuchtung des rechten umschlossenen Feldes mannigfach geändert und immer wieder diejenige Lichtstärke seines umschließenden Feldes gesucht, bei welcher das erstere infolge des Kontrastes wieder die anfängliche, der des linken umschlossenen Feldes gleiche Helligkeit annahm. Der Durchführung von 17 solchen Versuchsreihen folgten dann noch zahlreiche Kontrollversuche bei abgeändertem Verfahren.

Es ergab sich aus diesen Versuchen, dass der zur Konstanthaltung der Farbe des Infeldes, wie das umschlossene kurz heißen möge, erforderliche Beleuchtungszuwuchs stets angenähert proportional zur jeweiligen Beleuchtung des Umfeldes war. Als z. B. die anfängliche Beleuchtung des rechten Infeldes gleich 300 Lichteinheiten war, betrugen die zur Konstanthaltung der Farbe des Infeldes erforderlichen Beleuchtungszuwüchse desselben stets ziemlich genau die Hälfte der jeweiligen Beleuchtungszuwüchse des Umfeldes. Doch galt dieser Kontrastkoeffizient 0,5 eben nur für den besonderen Fall, wo die Anfangsbeleuchtung des Infeldes 300 Lichteinheiten betrug; der Kontrastkoeffizient war größer bei stärkerer und kleiner bei schwächerer Anfangsbeleuchtung des Infeldes. Als dieselbe z. B. 500 Einheiten betrug, war er beiläufig 0,55; bei 37 Einheiten nur 0,35. Es sind dies Mittelwerte, welche sich aus den Versuchsreihen mit Wahrscheinlichkeit ableiten lassen; sie gelten selbstverständlich nur für die besonderen Versuchsbedingungen (Größe der Felder und Adaptationszustand des Auges) und werden hier nur erwähnt, um eine ungefähre Vorstellung von der Art ihres Wachsens mit der Anfangsbeleuchtung des Infeldes zu geben.

Bei diesen Versuchen wurde also angenommen, dass das linksseitige, während jeder Versuchsreihe unverändert belichtete Infeld, dem das rechtsseitige Infeld immer wieder gleichzumachen war, trotz der Veränderung der Belichtungen

des rechtsseitigen Um- und Infeldes seine Farbe nicht ändere. Strenge Gültigkeit kann diese Annahme nicht haben, weil sich eine Kontrastwirkung der variabel belichteten rechtsseitigen Felder auf die linksseitigen nicht ausschließen lässt. Gegenüber der relativ gewaltigen Kontrastwirkung aber, welche das rechtsseitige Umfeld auf sein Infeld ausübte, durften kleine Kontrastwirkungen auf das entfernte Infeld der anderen Seite vorerst vernachlässigt werden.

§ 30. Die Simultananpassung als Ergebnis des Simultankontrastes. Die von Hess und Pretori gefundene Regel einer angenäherten Proportionalität zwischen den positiven bezw. negativen Beleuchtungszuwüchsen eines Umfeldes und den zur Konstanthaltung der Farbe seines Infeldes nötigen positiven bezw. negativen Zuwüchsen zur Beleuchtung des letzteren bietet Veranlassung, an einem besonders einfachen Beispiel das zu erläutern, was ich in § 6 als simultane Adaptation bezeichnet habe.

Nehmen wir an, es seien unter den im vorigen Paragraphen beschriebenen Umständen beide Um- und Infelder zunächst gar nicht beleuchtet, so würde der Beobachter, wenn er das Auge aufschlägt, an ihrer Stelle nur die Eigenfarbe seines Sehfeldes sehen. Wäre dann vor der nächsten Beobachtung das rechte Umfeld irgendwie belichtet worden, so würde er dessen Infeld dunkler sehen, als die zuvor von ihm gesehene Eigenfarbe war. Um das Infeld trotz dieser verdunkelnden Wirkung des beleuchteten Umfeldes wieder wie vorher und also in der Eigenfarbe des Auges erscheinen zu lassen, müsste es mit einem bestimmten Bruchteil der jeweiligen Belichtung des Umfeldes belichtet werden, d. h. die Lichtstärken beider Felder müssten in demjenigen Verhältnis zu einander stehen, welches dem hier eben geltenden Kontrastkoeffizienten entspricht.

Man denke sich nun als Infeld statt des Loches ein graues Papier, dessen Kreiselwert zum Kreiselwert des umgebenden Magnesiaweiß gerade in diesem, durch den Kontrastkoeffizienten ausgedrückten Verhältnis steht. Dieses Lichtstärkenverhältnis würde bei jeder beliebigen gemeinsamen Beleuchtung des Um- und Infeldes dasselbe bleiben. Da es dem hier geltenden Konstrastkoeffizienten entspricht, so würde der Beobachter, so oft er das zwischendurch wieder verfinstert gewesene Auge aufschlägt, bei jeder beliebigen gemeinsamen Beleuchtung des Um- und Infeldes das letztere immer wieder in derselben Farbe und zwar in demjenigen Grau sehen, dessen Helligkeit gleich der Durchschnittshelligkeit der Eigenfarbe seines dunkeladaptierten Auges war[1]).

[1]) Das Eigenhell des verfinsterten Auges erscheint mir nicht als eine vor den Augen befindliche graue Fläche, sondern als ein raumhafter unsteter Lichtnebel. Vielleicht würde es besser gelingen, es flächenhaft zu sehen, wenn es eine wahrnehmbare Grenze zum Rahmen hätte, denn sobald es Nachbilder enthält, wird es für mich zur Fläche. Es ist weder homogen noch stetig, sondern

Wir hätten hier also ein Beispiel für die in § 6 erwähnte Konstanz der Farbe eines Außendinges trotz verschiedener Gesamtbeleuchtung des Gesichtsfeldes und, wie hier hinzugefügt werden muss, auch trotz einem und demselben Anpassungszustande vor jeder Öffnung des Auges, ein Beispiel aber, welches in seiner ausnahmsweisen Einfachheit seine Erklärung sogleich mit sich bringt. Dieselbe liegt wie gesagt darin, dass das Verhältnis zwischen den Lichtstärken des Um- und Infeldes zufällig gerade dasjenige ist, bei welchem die mit der gemeinsamen Beleuchtung wachsende und an und für sich verdunkelnde Wirkung des Umfeldes auf das Infeld durch die ebenfalls wachsende Lichtstärke des letzteren immer wieder kompensiert wird.

Es ist auch ohne weiteres ersichtlich, dass wenn das als Infeld dienende graue Papier eine größere relative Lichtstärke (größeren Kreiselwert) hätte, als wie sie dem eben geltenden Kontrastkoeffizienten entspricht, seine Farbe bei zunehmender gemeinsamer Beleuchtung zunehmend weißlicher (heller) erscheinen müsste. Denn die verdunkelnde Wirkung der wachsenden Lichtstärke des Umfeldes würde dann unzureichend sein, die erhellende Wirkung der gleichzeitig wachsenden Lichtstärke des Infeldes immer wieder genau zu kompensieren. Ebenso ist ersichtlich, dass wenn wir das Infeld aus einem Grau von kleinerer relativer Lichtstärke (kleinerem Kreiselwert) gebildet hätten, als wie sie der Kontrastkoeffizient fordert, dieses Grau mit wachsender gemeinsamer Beleuchtung immer schwärzlicher werden müsste.

So giebt also dieser einfache Fall von simultaner Kontrastwirkung auch den Schlüssel für die nach den üblichen Ansichten über das Wachsen der Helligkeit mit der Lichtstärke paradox erscheinende Thatsache, dass wenn wir unser dunkeladaptiertes Auge vor einem, entsprechend der gesteigerten Lichtempfindlichkeit schwach beleuchteten Gesichtsfelde öffnen, nur ein Teil der beleuchteten Dinge uns weißlicher (heller) erscheint als das kurz zuvor gesehene Eigengrau unseres Auges, ein anderer Teil dieser Dinge aber, obwohl auch sie Licht in unser Auge schicken, uns sofort schwärzlicher erscheint, als dieses Eigengrau (vgl. S. 30 u. 70).

Denn aus der Mannigfaltigkeit verschieden lichtstarker Felder, welche das eben gegebene Gesichtsfeld zusammensetzen, können wir ein beliebiges auswählen und es uns als Infeld, seine Umgebung bezw. das ganze übrige Gesichtsfeld aber als sein Umfeld denken. Aus den sämtlichen Einzelwir-

---

fleckig, wolkig und an derselben Stelle abwechselnd weißlicher und schwärzlicher. Wie man von einer Meeresebene spricht, obgleich seine Oberfläche stets mehr oder weniger auf- und abwogt, so spreche ich von der jeweiligen Durchschnittsfarbe des Sehfeldes. Würde sich uns bei verfinstertem Auge das Sehfeld als eine homogene Fläche darstellen, so würde man sich leichter mit Anderen über seine Farbe verständigen können.

kungen der Einzelstellen dieses Umfeldes, besonders aber aus denen der nächst benachbarten Stellen wird ein summarischer verdunkelnder Einfluss auf unser Infeld resultieren. Wäre nun der Reizwert der Lichtstärke des Infeldes zufällig gerade so groß, dass seine erhellende Wirkung der verdunkelnden des Umfeldes das Gleichgewicht hält, so würde uns das Infeld in derselben Helligkeit erscheinen wie zuvor das Eigengrau des Auges; ist aber dieser Reizwert kleiner, so wird das Infeld dunkler als dieses Eigengrau gesehen werden, also schwärzlicher bezw. schwarz. Was von dem einen Einzelfelde gilt, muss auch von jedem anderen gelten; doch wird je nach seiner Lage im Gesichtsfelde und je nach den Remissionswerten seiner nächsten Umgebung der für dasselbe geltende Kontrastkoeffizient ein verschiedener und also auch der zur Konstanthaltung seiner Farbe erforderliche eigene Remissionswert ein anderer sein.

Die Versuche von Hess und Pretori wurden mit dunkeladaptiertem Auge angestellt, aber auch für das helladaptierte gelten analoge Erwägungen wie die eben angestellten. Es genügt zu wissen, dass bei einer Änderung der gemeinsamen Beleuchtung eines Um- und Infeldes, welche zu rasch erfolgt, als dass ihr die Successiv-Anpassung des Auges zu folgen vermag, drei Möglichkeiten für die Farbe des Infeldes vorliegen. Je nach dem Werte des für letzteres eben geltenden Kontrastkoeffizienten, ferner je nach dem Verhältnis zwischen den Remissionswerten der beiden Felder, und endlich je nach dem unmittelbar vor jener Änderung gegebenen Stande der successiven Adaptation, kann sich die Helligkeit der Infeldfarbe bald steigern, bald mindern, bald unverändert bleiben. Immer wird im Gesichtsfelde ein Einzelfeld denkbar oder wirklich vorhanden sein können, welches trotz der Änderung der Gesamtbeleuchtung seine Farbe nicht ändert, für dessen mitgeänderte Lichtstärke also das Auge infolge des Simultankontrastes sofort wieder derart angepasst ist, dass ihm die Farbe desselben wieder ebenso wie vor der Beleuchtungsänderung erscheint.

Eine strenge Gültigkeit der von Hess und Pretori aufgestellten Regel ist hierzu nicht erforderlich. Das Wesentliche dieser momentanen oder simultanen Anpassung des Auges liegt darin, dass bei schneller Steigerung der Gesamtbeleuchtung des Gesichtsfeldes und also auch der Netzhaut nicht alle Farben der Außendinge weißlicher werden, dass vielmehr gewisse Dinge ihre Farbe sehr wenig oder gar nicht ändern, andere ihre Farben in der Richtung nach dem absoluten Weiß hin viel weniger ändern, als ohne die Simultananpassung der Fall sein müsste, noch andere sogar schwärzlicher werden; dass ferner bei schneller Minderung der Gesamtbeleuchtung ebenfalls gewisse Dinge ihre Farbe wenig oder gar nicht ändern, andere minder weißlich und noch andere minder schwärzlich werden, als ohne diese Anpassung zu erwarten wäre.

Dass nicht nur das Umfeld auf das relativ kleine Infeld, sondern auch letzteres auf das erstere wirkt, brauchte hier vorerst nicht berücksichtigt zu werden, wird aber später (VII. Abschnitt) die nötige Beachtung finden. Es schien mir wichtig, bei der obigen Erörterung von jeder Hypothese über das Wesen der Wechselwirkungen abzusehen, die Feststellung einer Simultananpassung lediglich durch die beschriebenen Thatsachen des Simultankontrastes zu begründen und so von jeder Theorie dieser Erscheinungen unabhängig zu machen. Auch wurde im ganzen V. Abschnitt der Einfachheit wegen an der einseitigen Auffassung festgehalten, als ob es sich beim Simultankontraste nur um ein Mehr oder Weniger einer verdunkelnden Wirkung, nicht aber auch mit um erhellende Kontrastwirkungen handeln könne (vgl. den VII. Abschnitt).

§ 31. Beobachtung des simultanen Helligkeitskontrastes ohne Vergleichsfeld. Wenn es sich nicht um Vergleichung der Helligkeiten zweier in verschieden lichtstarker Umgebung befindlicher Felder, sondern um Beobachtung der Helligkeitsänderungen handelt, welche ein und dasselbe umschlossene Feld trotz gleichbleibender eigener Lichtstärke während einer Änderung der Lichtstärke seiner Umgebung zeigt, so verdient ein klassischer Versuch von Fechner (25) zuerst erwähnt zu werden.

Stellt man auf eine weiße Fläche ein Petschaft oder einen Stab und in verschiedenem Abstande von demselben zwei brennende Kerzen, so sieht man zwei Schatten. Auf den von der näheren bezw. stärkeren Flamme geworfenen, welcher der dunklere ist, mache man eine schwarze Marke und bringe zwischen den Stab und die nähere Flamme einen kleinen Schirm, so dass dieser Schatten verschwindet. Fixiert man nach zureichender Pause die Marke und entfernt dann den Schirm, so verdunkelt sich plötzlich die unmittelbar zuvor gleich hell wie ihre Umgebung erschienene Schattenstelle, d. h. man sieht wieder den grauen oder schwarzgrauen Schatten, obwohl die Lichtstärke der entsprechenden Stelle des weißen Papieres ganz unverändert geblieben ist.

Auch die Lochmethode erweist sich hier vielseitig verwendbar. Man benutzt z. B. einen großen undurchscheinenden, mit einem Loche versehenen weißen Schirm, hinter dem sich in zureichendem Abstand ein zweiter kleinerer weißer Schirm von derselben Oberflächenbeschaffenheit befindet. Jeder Schirm muss ganz unabhängig vom andern beliebig stark beleuchtet werden können.

Zunächst regle man z. B. beide Beleuchtungen so, dass das Loch im Vorderschirm genau dieselbe Helligkeit zeigt, wie dieser Schirm selbst, welchenfalls es bei ganz sauberer Beschaffenheit seiner Ränder unsichtbar werden kann. Nachdem das Auge sich an die gewählte z. B. mittle Lichtstärke angepasst hat, fixiert man einen beliebigen markierten Punkt des Vorderschirmes und lässt dann die Beleuchtung des letzteren schnell abschwächen oder verstärken: immer wieder wird man überrascht sein durch die Helligkeitsänderungen des Loches, dessen eigene, nur von der

Beleuchtung des Hinterschirmes abhängige Lichtstärke ganz unverändert geblieben ist. Nach erfolgter Einstellung des Loches auf gleiche Helligkeit mit dem Vorderschirm sind sogar bei kleinen Änderungen der Lichtstärke des letzteren die Helligkeitsänderungen des Loches viel auffälliger als die des Schirmes selbst und zwar auch dann, wenn man auf letzteren besonders achtet.

Eine andere von mir vielfach verwendete Versuchsmethode, auf die noch öfter zurückzukommen sein wird, ist die folgende. Gesetzt man hat zwei, durch eine Thür verbundene Zimmer zur Verfügung, welche beliebig beleuchtet oder verfinstert werden können. In der Thüre sei in passender Höhe eine Öffnung, und der eben erwähnte weiße Vorderschirm sei dicht an der Thüre so angebracht, dass sein Loch vor diese Öffnung zu liegen kommt. Im zweiten Zimmer befindet sich in hinreichendem Abstande von der Thüre der Hinterschirm auf einem Stativ, so dass ihm eine beliebige Lage zu dem seitlich liegenden lichtgebenden Fenster oder einem im Fensterladen befindlichen verstellbaren Diaphragma bezw. zu einer künstlichen Lichtquelle gegeben werden kann.

Man giebt z. B. dem Vorderschirm die bestmögliche Beleuchtung und lässt die des Hinterschirmes soweit mindern, bis das Loch des ersteren eben schwarz wird. Nach längerem Verweilen des Auges auf einer größeren grauen Fläche fixiert man einen Punkt des Vorderschirmes oder auch des Loches und lässt das vordere Zimmer schnell verfinstern: dabei leuchtet das eben noch schwarz erschienene Loch auf und erscheint in einem hellen Weiß. Nun fixiert man einen anderen Punkt des Vorderschirmes und lässt denselben sofort wieder in der früheren Weise beleuchten: jetzt verdunkelt sich das soeben noch weiß erschienene Loch und wird wieder schwarz. Bei alledem kann seine eigene Lichtstärke durchaus unverändert geblieben sein; denn das etwa vom Gesichte des Beobachters zu dem Hinterschirme gelangende Licht kommt hier nicht in Betracht und lässt sich übrigens durch eine schwarze Samtmaske ausschließen, und auch die Veränderung der Pupillenweite spielt dabei keine wesentliche Rolle. Hält man bei diesen Versuchen ein Diaphragma, dessen Loch nur 2 mm Durchmesser hat, dicht vor das Auge, so ändert sich der Erfolg nicht merklich.

Die soeben beschriebenen Versuche sind besonders für diejenigen von Wichtigkeit, welche im Anschluss an Helmholtz u. A. geneigt sind, die Erklärung des reinen Nebenkontrastes in »Urteilstäuschungen« zu suchen.

Hierher gehört eine Thatsache, die vielen Lesern schon bekannt sein wird. Blickt man bei weit vorgeschrittener Dämmerung durch ein Fenster nach dem noch schwach erhellten Himmel, so wird derselbe sofort schwarz, wenn das Zimmer plötzlich stark erleuchtet wird.

Beobachtungen an zwei gleich großen Feldern verschiedener Lichtstärke. Bis hierher wurden nur Fälle in Betracht gezogen,

in denen kleine Felder von größeren umschlossen waren, weil dabei aus noch zu besprechendem Grunde die Erscheinungen des reinen Nebenkontrastes besonders eindringliche sind. Derselbe kommt jedoch bei jeden zwei aneinander grenzenden Feldern verschiedener Lichtstärke in Betracht, mögen ihre Größen und ihr Größenverhältnis wie immer sein.

Ein besonderer Fall ist der einer gleichen Größe beider Felder. Mit Hilfe passender Vorrichtungen, wie solche später zu beschreiben sein werden, lässt sich jede Hälfte des Gesichtsfeldes eines Fernrohres unabhängig von der anderen in bequem zu regelnder Weise beleuchten. Giebt man zunächst beiden Hälften die gleiche Lichtstärke so, dass das ganze Feld in demselben mäßig hellen Weiß erscheint, und vergrößert sodann die Lichtstärke der einen Hälfte, während man unter Fixierung der Grenzlinie auf die andere achtet, so sieht man diese unverändert gelassene Hälfte deutlich an Helligkeit verlieren und ihr Weiß verwandelt sich in ein zunehmend schwärzlicher werdendes Grau. Bringt man wieder beide Hälften auf die gleiche anfängliche Lichtstärke zurück und vermindert dann nach zureichend langer Pause die Lichtstärke der einen Hälfte, so sieht man die andere heller werden und ihr Weiß verwandelt sich in ein immer reiner werdendes Weiß. Es ändern sich hierbei gleichzeitig b e i d e Hälften, stärker diejenige, deren Lichtstärke verändert wird, schwächer die andere von unveränderter Lichtstärke.

Versuche nach Analogie des soeben beschriebenen sollen stets nur an solchen Farbenfeldern angestellt werden, welche nicht an einen bestimmten Träger der Farbe erinnern. Blickt man z. B. durch eine Dunkelröhre auf ein mattschwarzes Papier, so erscheint dasselbe heller, und wer es nicht zuvor ohne die Röhre gesehen hat, nimmt es für ein graues Papier. Schiebt man dann auf dem schwarzen Papier ein weißes soweit in das Gesichtsfeld der Röhre, dass es dessen eine Hälfte einnimmt, so kann man von verschiedenen Beobachtern verschiedene Angaben erhalten. Der eine sagt, das Papier der anderen Hälfte sei jetzt schwarz geworden, ein anderer, es habe seine Farbe nicht geändert. Hier treten die Gedächtnisfarben (§ 4) mit ins Spiel. Daher haben solche Versuche wohl psychologisches, aber vorerst noch kein physiologisches Interesse. Ich erwähne dies nur, um ein Beispiel für die Vermengung der Kontrasterscheinungen mit solchen Erscheinungen zu geben, welche durch Einmischung einer auf individueller Erfahrung beruhenden Reproduktion bedingt sind.

Überhaupt könnten Thatsachen von der Art der in diesem Paragraphen besprochenen zu Gunsten der Ansicht verwertet werden, nach welcher alle simultanen Helligkeitskontraste darauf beruhen sollten, dass sich dabei »der Begriff des Weiß« verschiebt. Da sich aber dieser »Begriff des Weiß« nicht nach zwei entgegengesetzten Richtungen zugleich verschieben kann, so versagt diese Art von Erklärung von vornherein in allen den Fällen, wo sich wie in den in § 26 beschriebenen Fällen innerhalb einer und derselben Kontrastfigur gleichzeitig eine Erhellung und eine Verdunkelung durch Simultankontrast zeigt. Wollte man aber in solchen Fällen doch behaupten, dass der »Begriff des Weiß« sich gleichzeitig für die eine Hälfte der Figur in der einen, für die andere in der anderen

Richtung verschieben könne, so müsste man sich doch der Mühe unterziehen, die Gesetze dieser rein lokalen Begriffsverschiebungen festzustellen und also das Analoge von dem zu thun, was wir im Obigen versucht haben.

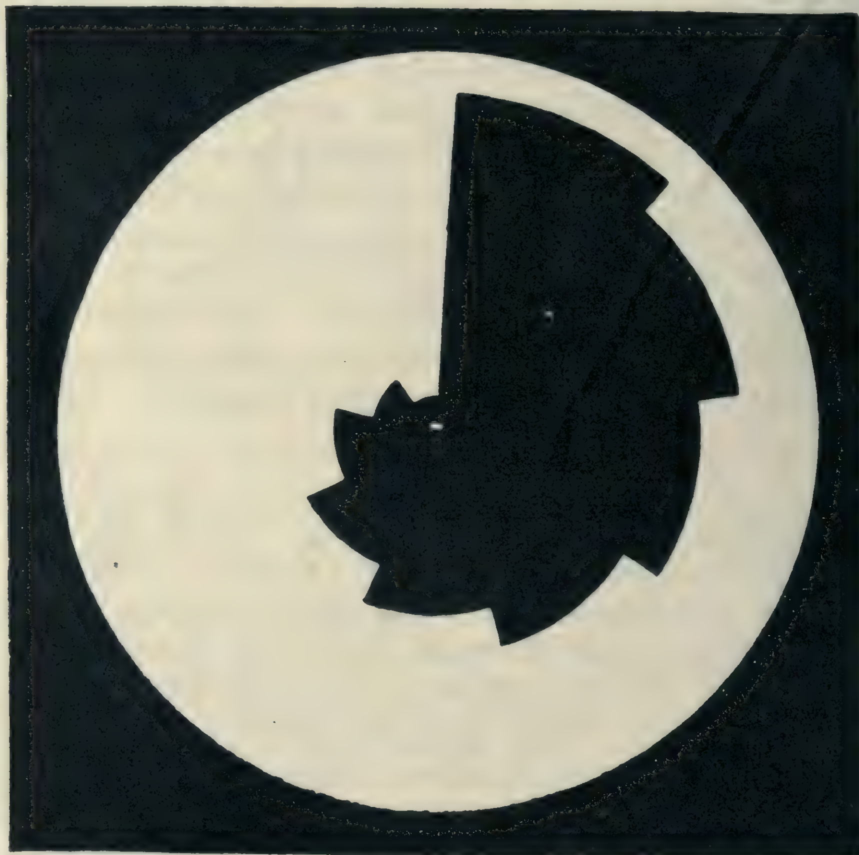
Das Weitere wird übrigens so zwingende Beweise gegen die früher übliche und noch immer wenigstens teilweise verteidigte Erklärung des Nebenkontrastes aus »unbewussten Urteilen oder Schlüssen« bringen, dass mir eine ausführliche Kritik derartiger Auffassungen nicht mehr nötig erscheint.

Die Beobachtung des Nebenkontrastes an einem Felde, das aus zwei gleich großen, verschieden lichtstarken Hälften besteht, zeigt uns, dass wir bei allen früher besprochenen Kontrasterscheinungen einer einseitigen Auffassung insofern gefolgt sind, als wir immer nur einen Einfluss des umschließenden Feldes auf das umschlossene in Betracht gezogen haben. Absichtlich habe ich bisher keine Rücksicht darauf genommen, dass wenn es sich um eine gegenseitige funktionelle Abhängigkeit der somatischen Sehfeldstellen handeln soll, die jeweilige Regung im umschlossenen Sehfeldbezirke auch auf die Regung im umschließenden von Einfluss sein kann. Im Falle gleicher Größe der beiden aufeinander wirkenden Felder ist es gleichgültig, welches von beiden wir zum »kontrastwirkenden« und welches zum »kontrastleidenden« wählen wollen. Aber aus zwei Gründen empfahl es sich, bei der Vorführung der Kontrasterscheinungen nicht mit diesem einfachsten Falle zu beginnen. Erstens können wir uns bei demselben von der durch Kontrast bewirkten Helligkeitsänderung nicht auf Grund einer Simultanvergleichung mit einem dritten Felde überzeugen, das nicht derselben Kontrastwirkung unterliegt, sind vielmehr auf die successive Vergleichung der anfänglichen mit der durch Kontrast veränderten Helligkeit angewiesen. Zweitens sind die durch Simultankontrast bewirkten Helligkeitsänderungen auf einem kleinen an zwei Seiten oder allseitig von dem »kontrastwirkenden« Felde umschlossenen Bezirke viel stärker, als an einem nur einseitig von gleich großem wirkenden Felde begrenzten. Dies hat seinen Grund darin, dass, wie sogleich zu erörtern sein wird, die Stärke der Wechselwirkung zweier somatischen Sehfeldelemente mit deren gegenseitigem Abstand rasch abnimmt. Hierfür wird der nächste Paragraph Belege bringen.

§ 32. Vom simultanen Grenzkontrast. Wenn Felder von ungleicher Lichtstärke aneinandergrenzen, so sieht man unter günstigen Umständen, und zwar zuweilen auch bei Ausschluss jedes Nachkontrastes, in der Nähe der Grenzlinie des lichtstärkeren Feldes eine Zunahme seiner Helligkeit, welche an der Grenzlinie selbst ihr Maximum erreicht, während umgekehrt die Helligkeit des lichtschwächeren Feldes an der Grenzlinie am kleinsten ist und mit dem Abstande von derselben schnell zunimmt. Besonders deutlich ist dieser Grenzkontrast auf einem schmalen Felde von gleichmäßiger Lichtstärke, welches zwischen einem lichtstärkeren und einem

lichtschwächeren liegt; die Helligkeit eines solchen wächst von der einen Grenze bis zur anderen. Solche schmale Felder lassen sich leicht auf einem Farbenkreisel herstellen (vgl. HELMHOLTZ 1, S. 413). Wenn man z. B. eine Scheibe, wie sie Fig. 28 um die Hälfte verkleinert darstellt, zureichend schnell rotieren lässt, so erscheint sie wie Fig. 1, Taf. III, welche ein phototypisches Abbild der rotierenden Scheibe ist. Die einzelnen konzentrischen Ringe, deren Lichtstärke stufenweise von außen nach innen abnimmt, erscheinen derart abschattiert, dass jeder an der Grenze des nächst größeren

Fig. 28.



und lichtstärkeren Ringes dunkler, an der Grenze des nächst kleineren und lichtschwächeren heller ist, als in seiner Mittelzone. In Wirklichkeit ist die Lichtstärke jedes Ringes in seiner ganzen Breite dieselbe, wovon man sich überzeugen kann, wenn man aus einem grauen Papier ein Fenster in Form eines Ringsektors ausschneidet, welcher genau auf einen Ring der Figur passt, so dass beim Auflegen des Papieres nur der entsprechende Teil dieses Ringes sichtbar ist.

Die Bedingungen für die Wahrnehmung des Grenzkontrastes sind hier besonders günstige, weil der Kontrast an der einen Grenze jedes Ringes in entgegengesetztem Sinne wirkt als an der anderen.

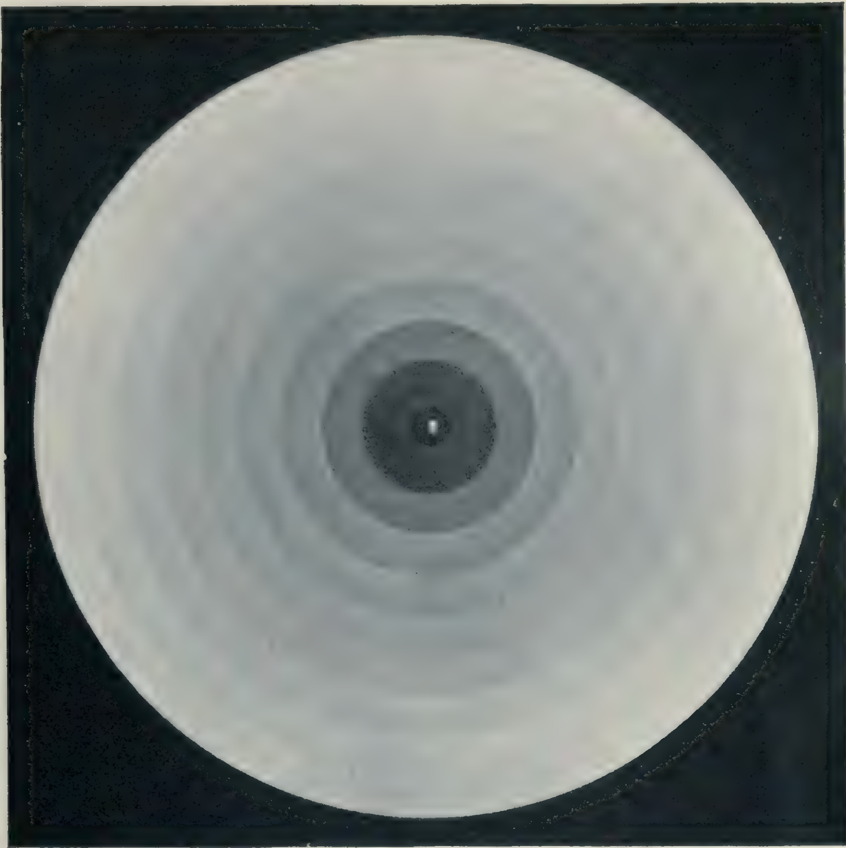


Fig. 1.



Fig. 2.

Verlag von Wilhelm Engelmann in Leipzig.

Um festzustellen, inwieweit die Erscheinung auch bei Ausschluss des Nachkontrastes sichtbar ist, stellt man wieder nahe vor der Scheibe einen stumpf endenden Draht auf, schiebt dicht hinter denselben ein steifes graues Blatt, welches die Scheibe verdeckt, lässt dann die Scheibe rotieren und fixiert mit einem Auge das womöglich etwas glänzende Drahtende. Wird dann das graue Blatt schnell weggezogen, so sieht man günstigenfalls und zwar sofort eine ungleiche Helligkeit innerhalb des hinter dem Drahtende erscheinenden Ringes, besonders dann, wenn sich das erstere auf einen Punkt der Mittellinie des Ringes projiziert. Übrigens aber kann man dabei auch an weiter indirekt gesehenen Ringen Grenzkontraste wahrnehmen.

Bei diesen durchaus nicht leichten Beobachtungen gilt es, besonders den ersten Eindruck zu erfassen, weil bei etwas längerem festen Fixieren die Ringe sehr bald in ihrer ganzen Breite gleich hell werden. Fixiert man aber nicht ganz fest, so mischt sich sofort wieder der Nachkontrast ein.

Am überzeugendsten hat auf mich die folgende Beobachtung gewirkt. Die rotierende Scheibe war direkt von der Sonne beschienen; dicht vor meinem Auge befand sich ein Momentverschluss, welcher mir die Scheibe nur während $^1/_{40}$ Sekunde sichtbar machte. Dabei sah ich den Grenzkontrast deutlich und zwar auch noch im Nachbilde (III. Phase). Nie aber ist die Erscheinung bei Ausschluss der Augenbewegungen so eindringlich wie beim Sehen mit bewegtem Blicke.

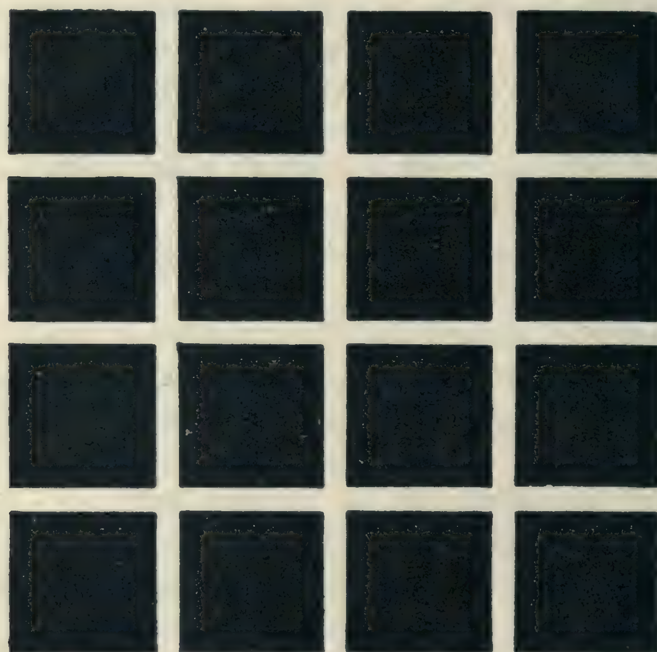
Eine vorläufige Erklärung des Grenzkontrastes ergiebt sich aus der Annahme, dass die einzelnen Elemente des somatischen Sehfeldes unter einander derart in Beziehung stehen, dass die durch Bestrahlung bedingte Regung eines Elementes auf die gleichfalls durch Bestrahlung gereizten Elemente seiner Umgebung um so stärker wirkt, je näher sie dem ersteren sind. Da sich diese Wechselwirkung, wie schon in § 28 erwähnt wurde, nicht bloß zwischen verschieden stark, sondern auch zwischen gleich stark gereizten Elementen geltend macht, so werden die einzelnen Teile eines gleichmäßig belichteten Sehfeldbezirkes sich gegenseitig verdunkelnd beeinflussen und minder hell erscheinen, als ohne diese Wechselwirkung der Fall wäre. Die nahe der Grenze eines Feldes befindlichen Elemente werden jedoch, wenn dasselbe an ein lichtschwächeres grenzt, von seiten der Elemente des letzteren minder stark verdunkelnd beeinflusst sein, als von seiten der dem eigenen Felde angehörigen Elemente, weil diese stärker belichtet sind als jene. Dagegen sind die von der Grenze weiter abliegenden Elemente des lichtstärkeren Feldes allseitig von stärker belichteten umgeben und daher einer stärkeren Verdunkelung ausgesetzt, als die Grenzelemente desselben Feldes. Die Folge ist, dass das lichtstärkere Feld an der Grenze eine größere Helligkeit zeigt als im übrigen. Umgekehrt können die der Grenze näher liegenden Elemente des lichtschwächeren Feldes einer stärkeren Verdunkelung unterliegen, als seine weiter abliegenden, weil

letztere allseitig, erstere aber nur einseitig von schwächer belichteten Elementen beeinflusst sind.

So versteht man, dass an der Grenze zweier Felder von verschiedener Lichtstärke das lichtstärkere eine nach der Grenzlinie hin zunehmende, das lichtschwächere eine abnehmende Helligkeit zeigt, wie dies in Fig. 1, Taf. III auch bei Ausschluss des Successivkontrastes bemerklich ist, wenn gleich hier wegen der mangelhaften Homogeneität der einzelnen Ringe nicht so erheblich wie auf der rotierenden Scheibe selbst.

Die bei obiger Erklärung des Grenzkontrastes gemachte Voraussetzung, dass das Ergebnis der Wechselwirkung der Sehfeldstellen stets in einer Verdunklung bestehe, wäre nach einer im VII. Abschnitt mitzuteilenden Theorie der Wechsel-

Fig. 29.



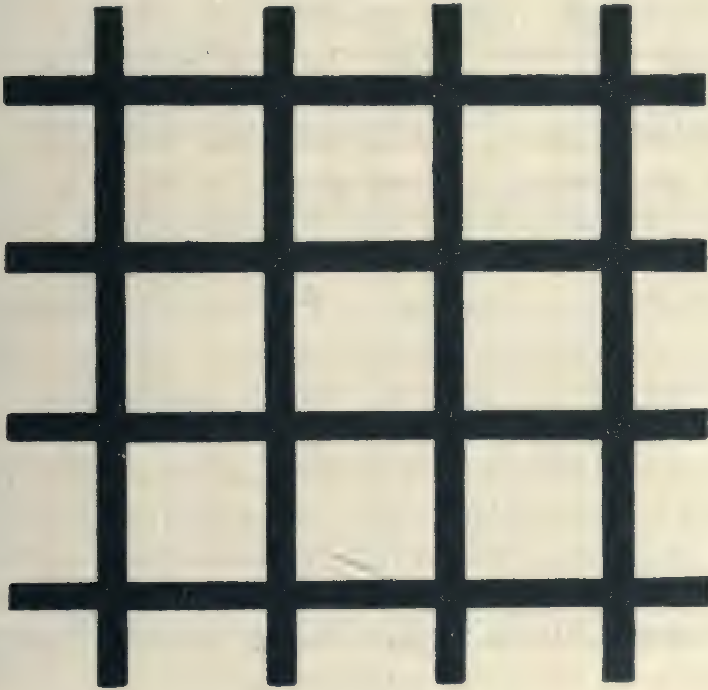
wirkung nur insoweit zutreffend, als es sich ausschließlich um übermittelgraue Felder handelt, d. h. also um solche, deren Weißlichkeit größer ist als ihre Schwärzlichkeit, während für untermittelgraue Felder eine Erhellung durch Wechselwirkung in Betracht käme. Hier kam es zunächst nur darauf an, überhaupt verständlich zu machen, wie infolge der Wechselwirkung der Sehfeldstellen ein Grenzkontrast entstehen kann. Ob die Helligkeit des helleren Feldes in der Nähe seiner Grenze deshalb zunimmt, weil es hier weniger verdunkelt, oder aber, weil es hier stärker erhellt wird als im übrigen, ändert nichts an der vorerst allein in Betracht kommenden Thatsache, dass es an der Grenze heller ist als im übrigen. Die analoge Erwägung gilt mutatis mutandis betreffs der nach der Grenze hin zunehmenden Schwärzlichkeit des dunkleren Feldes.

Daraus dass die Wirkung des Nebenkontrastes in der Nähe der Grenzlinie zweier Felder von verschiedener Lichtstärke besonders deutlich ist, erklärt sich die Deutlichkeit desselben auf kleinen umschlossenen Feldern. Befindet

sich z. B. in einem Felde von sonst gleichmäßiger Lichtstärke ein schmaler Streifen, welcher lichtschwächer oder lichtstärker ist als das übrige Feld, so wirkt der Grenzkontrast von zwei Seiten her verdunkelnd bezw. erhellend auf ihn, und wenn die Kontrastwirkung nur proportional mit dem Abstande von der Grenzlinie abnähme, so würde diese Wirkung in jedem Punkte des Streifens gleich groß sein und der letztere ganz gleichmäßig verdunkelt bezw. erhellt erscheinen müssen. Doch ist uns das Gesetz, nach welchem im vorliegenden Falle die Kontrastwirkung mit dem Abstande von der Grenzlinie abnimmt, nicht bekannt.

Liegt ein kleines kreisförmig umschlossenes Feld auf einem Felde von anderer Lichtstärke, so erstreckt sich der Grenzkontrast von der Peripherie her sozusagen konzentrisch ins Innere des Feldes und dasselbe wird von allen Seiten her verdunkelt bezw. erhellt.

Fig. 30.



Ein weiteres Beispiel für die Abnahme des Simultankontrastes mit der Entfernung liefert Fig. 29, auf die zuerst L. Hermann aufmerksam machte (31, S. 19). An jeder indirekt gesehenen Kreuzungsstelle zweier weißer Streifen erscheint bei bewegtem Blick ein sehr verwaschener grauer Fleck, weil diese Stelle in viel umfassenderer Weise von gleich lichtstarken Teilen umgeben ist, als jede andere gleichgroße Stelle der weißen Streifen (vgl. VII. Abschnitt). Die Erscheinung verschwindet rasch beim Festhalten des Blickes, und zwar infolge einer lokalen Anpassung, die später zu besprechen sein wird. Doch ist sie in den ersten Momenten nach dem Sichtbarwerden der Figur auch bei unbewegtem Auge in den indirekt gesehenen Teilen der Figur bemerklich und gehört insoweit mit zu den Erscheinungen des reinen

Simultankontrastes; als ich die Figur ins direkte Sonnenlicht legte und nur durch $^1/_{40}$ Sekunde sichtbar machte, konnte ich die grauen Flecke im indirekten Sehen wahrnehmen.

Das Gegenstück zu Fig. 29 ist Fig. 30, in welcher an den Kreuzungsstellen der schwarzen Streifen ein hellerer Fleck erscheint. —

Grenzt ein lichtstärkeres Feld an ein lichtschwächeres, so fällt die Lichtstärke des ersteren gleichsam senkrecht zu der des lichtschwächeren Feldes ab. Ein Grenzkontrast kann sich aber, wenigstens bei bewegtem Blicke, auch dann zeigen, wenn dieser Abfall ein allmählicher ist und die Hochebene der größeren Lichtstärke sozusagen mittels einer mehr oder weniger steilen Böschung in die Tiefebene der kleineren Lichtstärke übergeht. Dies gilt z. B. für die folgenden Fälle, bei welchen der Abfall ein allmählicher ist. Sie gehören zu den Kontrasterscheinungen, welche E. Mach in einer Reihe von Mitteilungen (13, 1865—1868 und 1906) beschrieben und diskutiert hat[1]. Obwohl diese Erscheinungen nach meiner Ansicht viel mehr dem successiven als dem simultanen Kontraste zu verdanken sind, will ich sie doch schon hier zur Sprache bringen, weil es Mach gelungen ist, einzelne derselben, wenngleich minder deutlich, auch bei Beleuchtung mit dem elektrischen Funken wahrzunehmen.

Wenn der Schatten der Kante eines besonnten undurchsichtigen Schirmes oder dergl. auf eine zureichend von letzterem entfernte homogene graue oder weiße Fläche fällt, so sieht man an der Grenze des im vollen Sonnenlichte liegenden Teiles die Helligkeit desselben zunehmen, so dass er hier durch einen helleren Streifen vom Halbschatten geschieden erscheint, obwohl in Wirklichkeit seine Lichtstärke bis an die Grenze des Halbschattens dieselbe ist. Dagegen erscheint der Kernschatten nahe seiner Grenze schwärzlicher als im übrigen, so dass er durch einen dunkleren Streifen von dem beginnenden Halbschatten getrennt erscheint, obwohl auch der Kernschatten überall von gleicher Lichtstärke ist.

---

1) Diese Mitteilungen sind reich an interessanten Beobachtungen und scharfsinnigen Versuchen und enthalten eine Reihe wichtiger Anregungen, haben aber wenig Beachtung gefunden. Infolgedessen ist ein Teil der von Mach entdeckten Thatsachen später als neu beschrieben worden. Er hat das Problem der simultanen Kontrastwirkung allgemein behandelt und kürzlich (13 V, S. 634) das »Thatsächliche« seiner Beobachtungen in folgender Weise zusammengefasst: »Die Beleuchtung einer Netzhautstelle wird nach Maßgabe der Abweichung dieser Beleuchtung von dem Mittel der Beleuchtungen der Nachbarstellen heller, beziehungsweise dunkler empfunden, je nachdem ihre Beleuchtung ober, beziehungsweise unter jenem Mittel liegt. Das Gewicht der Netzhautstellen in jenem Mittel ist hierbei als mit der Entfernung von der betrachteten Stelle rasch abnehmend zu denken.« Ich werde auf diese von Mach aufgestellte Regel sowie auf seine treffenden Bemerkungen über die Bedeutung der Wechselwirkung der Sehfeldstellen für das Sehen der Konturen zurückkommen.

Diese Erscheinungen des Grenzkontrastes sind jedoch nur dann auffallend, wenn man in zwangloser Weise und also mit bewegtem Blicke beobachtet. Sie verschwinden auch schnell wieder, wenn man einen Punkt der Fläche fest fixiert. Tauchen sie dann wieder auf, so kann man sicher sein, dass das Auge sich wieder bewegt hat. Markiere ich auf der teilweise beschatteten Fläche in oder neben dem Halbschatten einen Punkt, lasse durch einen größeren Schirm die Sonne abhalten, fixiere nach längerer Pause jenen Punkt und lasse dann sofort letzteren Schirm schnell wegziehen, so sehe ich nichts von der beschriebenen Kontrasterscheinung, solange ich das Auge ganz ruhig halte. Andere Beobachter bestätigten mir dies, womit nicht ausgeschlossen sein soll, dass unter besonders günstigen Umständen die Erscheinung auch ohne Mithilfe des Nachkontrastes wahrgenommen werden kann.

Wenn ein Zimmer das Licht des freien Himmels durch einen im Fensterladen befindlichen schmalen Ausschnitt erhält, dessen Breite mittels eines Schiebers geändert werden kann, und man stellt ihm gegenüber einen weißen von einem zweiten Schirme teilweise beschatteten Schirm auf, so lässt sich dem Halbschatten eine beliebige Breite geben und die anderweite Beleuchtung des beschatteten Schirmes durch ein zweites Fenster von veränderlicher Größe regeln. Dies ist für die genauere Untersuchung des Phänomens von besonderem Werte. Fig. 2, Taf. III ist die Kopie eines unter solchen Umständen photographierten Halbschattens. Sie ist nicht ganz treu, veranschaulicht aber gut das Wesentliche der Erscheinung.

Auch mit einer ruhig brennenden Kerze und zwei kleinen verschiebbaren Schirmen lassen sich in einem Dunkelzimmer solche Erscheinungen sehr gut hervorbringen, wobei man das Licht der Kerze vom Auge abzuhalten hat. Durch eine zweite Kerze lässt sich auch hier dem beschatteten Schirm eine variable Lichtstärke geben.

Über andere Methoden vgl. Mach, welcher auch rasch rotierende Scheiben und Cylinder benutzt hat, um analoge Verteilungen der Lichtstärke auf einer Fläche herbeizuführen.

VI. Abschnitt.

Das falsche Licht im Netzhautbilde.

§ 33. Die Ursachen der Abirrung des Lichtes im Auge. Die große Abhängigkeit der Sehschärfe von der Beleuchtung der Sehproben, welche so weit geht, dass bei Ausschluss einer Änderung der allgemeinen Adaptation schon die lokale Herabsetzung der Beleuchtung auf halbe Stärke eine merkliche Herabsetzung der Sehschärfe herbeiführen kann (vgl. § 21), steht in auffälligem Widerspruche zu der herrschenden Ansicht,

nach welcher bei gleichbleibendem Verhältnisse zweier Lichtstärken der Unterschied der von ihnen erzeugten Lichtempfindungen innerhalb weiter Grenzen von der absoluten Größe der Lichtstärken unabhängig sein soll. Sie führt, wie in § 36 näher dargelegt werden soll, zu dem Schlusse, dass das Netzhautbild auch bei bester Akkommodation des normalen Auges ein viel ungenaueres ist, als man anzunehmen pflegt, und dass seine Konturen viel verwaschener sind, als sie dank der Wechselwirkung der Sehfeldstellen uns erscheinen. Dies nötigt dazu, die Ursachen der Ungenauigkeit des Netzhautbildes im normalen und gut akkommodierten Auge eingehender zu erörtern, ehe wir zur Theorie jener Wechselwirkung übergehen.

Fällt direktes Sonnenlicht durch ein kleines Loch im Fensterladen eines Dunkelzimmers, so sieht man bekanntlich die Bahn des Lichtes schwach leuchtend infolge der in der Zimmerluft schwebenden Staubteilchen, während in reiner Luft diese Bahn unsichtbar bleibt. In reinem Wasser oder Glas aber ist, wenn anderes Licht vom Auge abgehalten wird, die ganze Bahn eines Sonnenstrahlbündels sichtbar. »Jede feste und flüssige durchsichtige Substanz, welche wir kennen, zerstreut kleine Mengen des Lichtes, welches durch sie hindurchgeht, nach allen Seiten und erscheint deshalb, wenn starkes Licht dnrch sie hindurchgeht, selbst schwach erleuchtet.« (Helmholtz 2, S. 553.) Ohne jede Vorsichtsmaßregel konnte ich im Dunkelzimmer den Weg eines Sonnenstrahlbündels, das ich durch ein Jenenser Glas gehen ließ, deutlich leuchten sehen, und zwar nicht infolge jener Fluorescenz, welche bei manchen Glassorten vorkommt, und sich durch die Farbe verrät.

»Man kann sich,« sagt Helmholtz l. c., »bei objektiven Versuchen mit Glaslinsen leicht überzeugen, dass das diffus zerstreute Licht immer am stärksten in der Nähe des regelmäßig gebrochenen Lichtbündels ist und schwächer wird, je weiter man sich von diesem entfernt. Lässt man Sonnenlicht durch die Öffnung eines schwarzen Schirmes auf eine entfernte Linse fallen, und fängt das Bild der hellen Öffnung auf einem weißen Schirme auf, so sieht man das helle Bildchen von einem weißen Nebelschein umgeben, der auch sichtbar wird, wenn man das Bild der hellen Öffnung selbst dicht am Rande des Schirmes vorbeigehen lässt. Jener weiße Nebelschein ist also keine im Auge entstehende Irradiation, sondern eine objektive Erscheinung. Noch besser sieht man es, wenn man in dem Schirm eine kleine Öffnung macht, die man dem Bilde der hellen Öffnung nahe bringt, ohne sie aber damit zusammenfallen zu lassen. Blickt man durch die Öffnung des Schirmes nach der Linse, so erscheint diese desto heller erleuchtet, je näher man dem optischen Bilde der Lichtquelle kommt.«

Nach alledem ist von vornherein zu erwarten, dass von jedem, die optischen Medien des Auges durchsetzenden Lichtbündel ein kleiner Teil

selbst dann diffus zerstreut werden würde, wenn dieselben ebenso »homogen« wären, wie reines Wasser oder Glas. Thatsächlich aber gesellt sich noch die viel stärkere zerstreuende Wirkung der mangelhaften Homogeneität der Hornhaut und der Linse, sowie die Wirkung der entoptischen Objekte im Glaskörper, eventuell an der Vorderfläche der Hornhaut und im Kammerwasser hinzu. Jeder Augenarzt weiß, dass, wenn man starkes Licht durch eine Konvexlinse in der Corneal- oder Linsensubstanz sammelt, dieselben weißlich trübe erscheinen.

So giebt schon allein die mangelhafte Homogeneität der optischen Medien des Auges reiche Gelegenheit dazu, dass ein kleiner Bruchteil des von einem Außendinge kommenden Lichtes gleichsam von der richtigen Bahn abirrt und außer der Stelle des bezüglichen Netzhautbildes einen kleineren oder größeren Bezirk der umgebenden Netzhaut fälschlich mit beleuchtet. Auch auf die Beugung des Lichtes am Pupillenrande ist hier zu verweisen (Helmholtz).

Um sich unter ganz gewöhnlichen Umständen bei Taganpassung des Auges eine Anschauung von der Ausbreitung des diffus abirrenden Lichtes zu verschaffen, halte man einen mattschwarzen, mit einem kleinen Loche versehenen Schirm in mittler Sehweite so vor ein Fenster, dass letzteres bis auf das Loch dem Auge gänzlich verdeckt wird, und durch das Loch ein entsprechend kleines Stück des hellen Himmels erscheint. Zunächst verdeckt man auch das Loch durch einen dahinter gehaltenen mattschwarzen Schirm. Zieht man dann letzteren bei festgestelltem Auge weg, so sieht man sofort um das leuchtende Loch einen hellen Saum, der in unmittelbarer Nähe des Loches am hellsten ist, und sich mit abnehmender Helligkeit, je nach den Umständen mehr oder weniger weit sichtbar, in das dunkle Sehfeld erstreckt. Da der das Loch umgebende Lichthof viel breiter sein kann, als das Loch selbst, und man sich die ganze nach Entfernung des Schirmes sichtbare, vom Fenster umrahmte Himmelsfläche aus kleinen Teilflächen zusammengesetzt denken kann, deren jede denselben Sehwinkel hat, wie das Loch, und ebenso wie dieses einen Lichthof zu erzeugen vermag, so ergiebt sich, dass innerhalb des Netzhautbildes jede einzelne Netzhautstelle unter dem Einflusse ganzer Scharen solcher Lichthöfe steht. Auf diese Weise gewinnt man eine Vorstellung von der großen Menge falschen Lichtes, welches sich über die Netzhaut ergießen kann.

Eine Flamme oder andere intensive Lichtquelle erscheint uns vor einem finsteren Hintergrunde schon bei Tage von einem großen leuchtenden Hofe umgeben, wieviel mehr des Abends in einem mangelhaft erleuchteten Zimmer. In einem Dunkelzimmer vermag selbst ein kleines intensiv leuchtendes Außending, abgesehen von seiner Bildstelle und deren nächster Umgebung, auch die ganze übrige Netzhaut hinreichend zu beleuchten, um das ganze Sehfeld heller erscheinen zu lassen. Je lichtempfindlicher das Auge durch

Dunkelanpassung geworden ist, eine desto geringere Lichtintensität eines Außendinges ist erforderlich, um sein abirrendes Licht wahrzunehmen. Bei maximaler Lichtempfindlichkeit kann sogar der scheinbar paradoxe Fall eintreten, das ein kleines, im sonst ganz lichtfreien Gesichtsfelde liegendes lichtschwaches Objekt, wenn es sich auf der Netzhautgrube abbildet, nicht unterschieden werden kann, während seine Umgebung infolge des falschen Lichtes hell erscheint, weil das längere Zeit verfinstert gewesene Auge für die excentrischen Teile des Gesichtsfeldes viel lichtempfindlicher ist als für den fixierten. Ein solcher Fall tritt insbesondere ein, wenn das kleine sehr lichtschwache Objekt vorwiegend oder ausschließlich kurzwelliges Licht aussendet, welches in trüben Medien viel mehr zerstreut wird als langwelliges. Man sieht hier das falsche Licht, nicht aber das auf der Netzhautgrube liegende Bild, von dem es abgeirrt ist.

Eine zweite wesentliche Ursache falschen Lichtes ist das von jeder beleuchteten Netzhautstelle zerstreut reflektierte und die ganze übrige Netzhaut schwach bestrahlende Licht. Erzeugt man sich im Dunkelzimmer auf einer möglichst excentrischen Netzhautstelle das Bildchen einer Flamme, so bestrahlt dasselbe bekanntlich wieder die übrige Netzhaut so erheblich, dass die Blutgefäße derselben einen sichtbaren Schatten auf die Empfangschichte der Netzhaut werfen, der bei jeder Verschiebung des leuchtenden Netzhautbildchens seinen Ort etwas ändert.

Eine besonders günstige Bedingung für die Bestrahlung der Gesamtnetzhaut durch ein lichtes Netzhautbild ist dann gegeben, wenn letzteres auf die Eintrittstelle des Sehnerven zu liegen kommt, wo die Lichtabsorption durch das Pigment wegfällt. In einem Dunkelzimmer befinde sich eine brennende Kerze oder noch besser ein elektrisches Glühlicht in einer Mattglaskugel. Man verdeckt ein Auge und richtet das andere so, dass Flamme oder Glühlicht sich im blinden Flecke abbilden, sichert durch eine Marke an der Wand den Fixierpunkt und verdeckt sodann durch einen kleinen Schirm die Lichtquelle für das offene Auge. Sobald man den Schirm wieder entfernt, sieht man das ganze Gesichtsfeld aufleuchten und zwar weitaus am stärksten in der dem blinden Flecke entsprechenden Gegend, ohne doch die Flamme oder elektrische Lampe selbst wahrzunehmen.

Eine dritte Quelle falschen Lichtes ist für die Netzhaut das durch die Sklera und die Iris ins Auge dringende Licht. Bei stärkerer seitlicher Beleuchtung des Augapfels oder schwacher Pigmentierung seiner Vorderhälfte ist die auf diese Weise eindringende und die ganze Netzhaut bestrahlende Lichtmenge sogar sehr erheblich, worauf gelegentlich zurückzukommen sein wird.

Mit alledem sind die Anlässe zu einer, der Lichtverteilung im Gesichtsfelde nicht entsprechenden Lichtverteilung im Netzhautbilde noch nicht erschöpft. Es kommt hinzu, dass die Umrisse der Einzelteile des Netzhaut-

bildes stets mehr oder weniger verwaschen, mindestens nie so scharf sind, wie man es auf Grund der theoretischen Dioptrik des Auges anzunehmen pflegt. Dies wird später näher zu erörtern sein.

Nie darf man vergessen, dass eine gänzlich unbeleuchtete Stelle auf der Netzhaut unmöglich ist, solange andere Stellen derselben irgendwie beleuchtet sind. Das Netzhautbild des Loches in dem früher beschriebenen Dunkelkasten ist, abgesehen von dem minimalen aus dem Kasten zurückkommenden Licht, noch außerdem um so stärker belichtet, je mehr beleuchtete Dinge sich außer ihm auf der Netzhaut abbilden.

Bei gegebenem Gesichtsfelde ist die Stärke alles falschen Lichtes direkt proportional zur Stärke der Beleuchtung des Gesichtsfeldes und zum Flächenwerte der Pupille.

§ 34. Einfluss des falschen Lichtes auf die Deutlichkeit des Sehens. Wie im § 19 gezeigt worden ist, wird der Helligkeitsunterschied, mit welchem uns zwei verschiedene Lichtstärken erscheinen, unter sonst gleichbleibenden Umständen verkleinert, wenn man beiden Lichtstärken einen gleich großen Zuwuchs erteilt. Ebenso muss die Deutlichkeit sich mindern, wenn die verschiedenen Lichtstärken der Einzelteile eines Netzhautbildes einen beiläufig gleichen Zuwuchs durch das über sie ergossene diffus abirrende Licht erfahren, und so die relativen Unterschiede ihrer Lichtstärken und damit zugleich die Helligkeitsunterschiede verkleinert werden.

Das Gesichtsfeld sei beleuchtet, ohne dass das durch die Fenster einfallende Himmelslicht oder das beleuchtende künstliche Licht unsere Netzhaut direkt zu treffen vermag. Von jedem, einem beleuchteten Flächenelemente des Gesichtsfeldes entsprechenden Strahlbündel irrt also schon beim Durchgang durch die optischen Medien des Auges ein, wenn auch noch so kleiner Teil nach den verschiedensten Richtungen, insbesondere aber in die Umgebung des jenem Elemente zugehörigen Netzhautbildes ab, und letzteres bestrahlt wieder, wenn auch noch so schwach, die ganze übrige Netzhaut. Aus der Summation aller dieser minimalen abirrenden Lichtmengen ergiebt sich erstens eine über die ganze Netzhaut ausgebreitete falsche Beleuchtung, welche sich überall dem Lichte der Netzhautbilder hinzufügt, und zu diesem allgemeinen falschen Lichte gesellt sich an der Grenze des einzelnen Netzhautbildes noch das von eben diesem Bilde abgeirrte Licht, welches dicht an der Grenzlinie am stärksten ist und allmählich abnehmend in das allgemeine abgeirrte Licht übergeht. Das letztere verdankt seine Entstehung der Gesamtheit des auf der Netzhaut Abgebildeten, das örtlich abgeirrte Licht aber ist ein Abkömmling des einzelnen Netzhautbildes; es umgiebt mit derselben relativen Stärke das lichtschwächste wie das lichtstärkste Bild, bemerklich aber wird es unter sonst günstigen

Umständen nur insoweit, als es von einem lichtstärkeren Bilde auf eine lichtschwache Umgebung abirrt.

Wo immer falsches Licht sich über ein Netzhautbild ausbreitet, mindert es zwar die Deutlichkeit des Sehens, doch macht sich dies nur in besonderen Fällen störend bemerkbar, wenngleich es dem aufmerksamen Beobachter viel häufiger begegnet. Wenn freilich die Lichtquellen, welche unser Gesichtsfeld beleuchten, selbst einen Bestandteil desselben ausmachen, und die Fenster, durch die das Himmelslicht einfällt, oder die brennende Lampe sich gleichzeitig mit den beleuchteten Dingen auf der Netzhaut abbilden, dann wird das falsche Licht so stark, dass es uns, wie man zu sagen pflegt, blendet. Auch wenn die Lichtquelle nicht so intensiv ist, dass sie eine schmerzhafte oder wenigstens unangenehme Empfindung hervorruft, wird sie doch unbequem dadurch, dass sie das deutliche Sehen beeinträchtigt und zwar um so mehr, je lichtschwächer die übrigen Netzhautbilder im Vergleich zum Bilde der Lichtquelle sind. Ein am Zwischenpfeiler zweier Fenster hängendes Bild wird unkenntlich, wenn dem Beschauer zu beiden Seiten desselben der helle Himmel erscheint; die Modellierung der Fensterstäbe verschwindet vollständig vor dem hellen Hintergrunde des Himmels; das Lesen einer feinen, nahe zur Lampe gehaltenen Schrift wird zuweilen erst möglich, wenn ein Schirm das direkte Licht vom Auge abhält; das Licht einer Blendlaterne, welches bei nächtlicher Dämmerung direkt in unser Auge fällt, macht uns blind für alles, was sonst im näheren Umkreise noch erkennbar gewesen wäre.

Wenn in solchen Fällen die neben der Lichtquelle sichtbaren Dinge durchaus nicht ungewöhnlich hell, sondern zuweilen sogar durch Kontrast verdunkelt erscheinen, so liegt der Irrtum nahe, ihre Undeutlichkeit nicht auf abgeirrtes Licht, sondern ausschließlich auf diese Verdunkelung zu beziehen. Solche Auffassung ist jedoch ausgeschlossen, wenn die Umgebung des lichtstarken Dinges nicht nur undeutlicher, sondern zugleich auch heller gesehen wird, wie z. B. in den folgenden Fällen:

Man klebe auf einen fingerbreiten Streifen mattschwarzen Papiers einige graue Papierschnitzel und halte den Streifen mit ausgestreckter Hand gegen den hellen Himmel, während man mit der anderen Hand einen großen mattschwarzen Papierschirm hinter den Streifen bringt. Die jetzt ganz deutlichen Schnitzel werden sofort unsichtbar, sobald man den Schirm entfernt, zugleich aber wird der nun vom hellen Himmel umschlossene Streifen sichtlich viel heller.

An einem sehr hellen Tage befestigte ich an der Zimmertüre einen großen Bogen schwarzen Papieres, auf welchen verschiedene kleine Scheiben (4 cm Durchmesser) und Schnitzel von weißen und verschiedenen grauen Papieren geklebt waren. In der ausgestreckten Hand eine brennende Kerze haltend, betrachtete ich aus 4 bis 5 m Entfernung mit einem Auge das

schwarze Papier, während ich von der Seite her die Flamme langsam der Blicklinie näherte. Sofort verschwanden zuerst die dunkelgrauen, beim Näherkommen des Flammenbildes die hellgrauen und schließlich auch die weißen Scheiben und Schnitzel, während sich zugleich über den schwarzen Grund eine Helligkeit ausbreitete. Dabei erschien meinem schwach kurzsichtigen Auge die Flamme scharf abgegrenzt, und eine weiße Scheibe verschwand bereits, wenn das ihr genäherte Flammenbild noch um seinen Durchmesser von derselben entfernt schien. Sah ich durch eine Brille die Scheiben u. s. w. scharf, wobei der Umriss der Flamme nur ein wenig verwaschen war, so verschwanden die weißen Scheiben, ihren jetzt schärferen Umrissen entsprechend, nicht vollständig, aber nahezu.

Stellt man den Versuch an einem trüben Tage oder bei schwacher künstlicher Gesamtbeleuchtung des Gesichtsfeldes an, so wird die gleichzeitige Steigerung der Helligkeit und Minderung der Deutlichkeit in der Nähe der Flamme noch viel auffälliger.

Im allgemeinen wird allerdings das von lichtstarken Netzhautbildern abgeirrte Licht nicht als solches bemerklich, weil es durch die verdunkelnde Kontrastwirkung solcher Bilder ausgeglichen oder übertönt wird. Die erhellende Wirkung des falschen Lichtes und die verdunkelnde des Simultankontrastes sind überall mit einander im Kampfe.

Man verdecke sich, vor dem Fenster stehend, den mäßig hellen Himmel durch einen großen mattschwarzen Schirm und halte einen ebenfalls mattschwarzen etwa 5 mm breiten Streifen in mittler Sehweite vor den Schirm. Entfernt man dann bei feststehendem Auge den Schirm, so hellt sich der zuvor schwarz erschienene Streifen sichtlich auf. Es ergießt sich in diesem Falle das abirrende Licht von zwei Seiten her über das Netzhautbild des Streifens, zwei Säume falschen Lichtes kommen auf seinem Bilde zur Deckung und zwar mit um so lichtstärkeren Teilen, je schmäler der Streifen und also auch sein Netzhautbild ist.

Jetzt ersetze man unter sonst ganz gleichen Umständen den »schwarzen« Streifen durch einen »weißen«, der durch ein zweites seitliches Fenster gut beleuchtet ist und weiß erscheint, so lange der schwarze Schirm dem Beobachter den Himmel verdeckt. Entfernt man jedoch den Schirm, so sieht man bei nicht allzu großer Lichtstärke des Himmels den fixierten weißen Streifen sich plötzlich infolge des Kontrastes stark verdunkeln, obwohl sich jetzt zu seinem eigenen Lichte ebenfalls wieder das falsche Licht gesellt und also sein Netzhautbild um genau ebenso viel lichtstärker wird, wie es zuvor das Netzhautbild des schwarzen Streifens wurde. Jetzt wird also die erhellende Wirkung des falschen Lichtes nicht nur unterdrückt, sondern sogar übertroffen durch die verdunkelnde Wirkung des Kontrastes. Wenn aber ein schwarzer d. h. relativ lichtschwacher Streifen sich infolge der

Erleuchtung seiner Umgebung aufhellt, ein weißer und also relativ lichtstarker sich dabei verdunkelt, so folgt, dass es einen Streifen von bestimmter mittler Lichtstärke geben müsste, welcher bei Entfernung des schwarzen Schirmes sich weder deutlich verdunkeln noch deutlich erhellen würde, weil die erhellende Wirkung des falschen Lichtes und die verdunkelnde des Kontrastes sich das Gleichgewicht halten.

Dies alles steht in Einklang mit dem, was wir im § 29 und zwar rein empirisch aus den messenden Kontrastversuchen abgeleitet haben. Wir fanden dort, dass es bei Steigerung der Lichtstärke in der Umgebung eines kleinen umschlossenen Feldes möglich ist, dessen Kontrastverdunkelung durch einen ganz bestimmten Zuwuchs seiner Lichtstärke aufzuheben, und dass bei gleicher Steigerung der Lichtstärke der Umgebung zu solcher Kompensierung ein um so größerer Zuwuchs zum Lichte des umschlossenen Feldes nötig ist, je lichtstärker das letztere von vornherein war. Bei den eben beschriebenen Versuchen bleibt der Lichtzuwuchs, welchen der Streifen (das umschlossene Feld) durch das falsche Licht erhält, immer derselbe, gleichviel welche Lichtstärke der Streifen selbst hat. Dieser Lichtzuwuchs aber ist nur bei einer ganz bestimmten Lichtstärke des Streifens eben genügend, der Konstrastverdunkelung das Gleichgewicht zu halten. Ist der Streifen lichtschwach, und das gilt von dem schwarzen Streifen, so erhält er durch das falsche Licht einen stärkeren Zuwuchs als zur Kompensierung der Kontrastwirkung nötig wäre, daher er sich aufhellt. Ist der Streifen lichtstark, wie dies von dem weißen gilt, so genügt das ihm zuwachsende falsche Licht nicht, die Kontrastwirkung zu kompensieren, daher er sich verdunkelt.

Es ist bemerkenswert, dass in den hier besprochenen Fällen von Sichtbarkeit des falschen Lichtes die Wirkung desselben sich im Sehfelde nicht als eine Änderung der sogenannten »wirklichen«, flächenhaften Farbe der bezüglichen Sehdinge zeigt. So erscheint uns der erwähnte leuchtende Hof der Flamme als ein dieselbe umgebender heller Nebel vor dem dunklen Hintergrunde auch dann, wenn wir in letzterem noch verschiedene Dinge zu unterscheiden vermögen, nicht aber als eine Verwandlung der Farbe dieser Dinge in eine hellere Farbe. Auch bei dem Versuche mit dem leuchtenden Loch im schwarzen Schirm oder mit dem schwarzen Streifen vor der leuchtenden Himmelsfläche erhalten wir nicht den Eindruck, als verwandle sich plötzlich die vorher schwarze Farbe der das Loch umgebenden Teile des Schirmes oder die schwarze Farbe des Streifens in eine graue. Vielmehr scheint sich ein accidentelles Helles vor oder auf die Fläche der bezüglichen Teile zu legen, durch welches hindurch die schwarze Farbe derselben sichtbar ist. Ich selbst vermag allerdings die Verwandlung des flächenhaften Schwarz in ein ebenfalls flächenhaftes Grau zu sehen, und von einem Maler, der den Eindruck im Bilde wiederzugeben versuchen wollte, würde dies wohl auch gelten; den meisten Menschen aber fällt solches schwer; ganz abgesehen davon, dass viele auf Befragen nicht das aussagen, was sie *sehen*, sondern das, was sie über das Gesehene *denken*.

§ 35. Herabsetzung der Deutlichkeit bei dem Zusammenwirken des falschen Lichtes und des verdunkelnden Kontrastes. Es ist die Ansicht ausgesprochen worden, dass jede Herabsetzung der centralen Sehschärfe, welche infolge gesteigerter Belichtung excentrischer Netzhautstellen eintritt, aus der Vermehrung des falschen Lichtes zu erklären sei, welches die centrale Netzhaut dabei empfängt. Wenn die unter solchen Umständen undeutlicher werdenden Sehdinge gleichzeitig heller erscheinen, als wie dies ohne die excentrische Belichtung der Netzhaut der Fall wäre, dann ist diese Ansicht sicher zutreffend; wenn aber dieses Hellerwerden fehlt, oder gar ein gleichzeitiges deutliches Dunklerwerden der centralen Sehdinge eintritt, so kann unter Umständen die verdunkelnde (schwärzende) Wirkung des Simultankontrastes einen viel größeren Anteil am Undeutlichwerden jener Sehdinge haben als die an sich erhellende (weißende) Wirkung des falschen Lichtes.

Während in den oben besprochenen Fällen, in denen die Quellen der Beleuchtung, wie das Himmelslicht oder eine Flamme, sich gleichzeitig mit dem übrigen Inhalte des Gesichtsfeldes auf der Netzhaut abbildeten, die verdunkelnde Kontrastwirkung der lichtstarken Netzhautbilder auf das übrige lichtschwächere Sehfeld überkompensiert werden konnte durch den starken Zuwuchs falschen Lichtes, zeigt sich beim gewöhnlichen Sehen im allgemeinen das Gegenteil, d. h. die verdunkelnde Wirkung der lichtstarken Teile des Netzhautbildes kompensiert oder überkompensiert die an sich erhellende Wirkung des gesteigerten falschen Lichtes. Wäre letzteres nicht möglich, so könnte es nie zu einer sichtbaren Verdunkelung durch Simultankontrast kommen, wofür wir doch schon so schlagende Beispiele kennen gelernt haben. Diese Verdunkelung eines Sehfeldbezirkes durch Kontrast kann unter günstigen Umständen so weit gehen, dass die Deutlichkeit der in dem Bezirke erscheinenden Sehdinge sehr auffallend gemindert bezw. bis zur Unkenntlichkeit herabgesetzt wird. Hierfür zwei Beispiele:

Ich stelle mich mit dem Rücken an's Fenster und bringe dicht an mein Auge eine innen mattschwarze 30 cm lange Röhre (Dunkelröhre) und dicht an das andere Ende derselben ein großes steifes, gänzlich undurchscheinendes weißes Blatt mit einem centralen Loche von 10—12 mm Durchmesser. Durch letzteres blicke ich nach einem Kupferstich an der mir gegenüber befindlichen Wand, oder nach dem Inhalt eines an derselben stehenden offenen Schrankes mit allerlei kleinen Dingen, die ich scharf und deutlich sehe. Indem ich die Mitte oder den Rand des Loches fixiere, entferne ich rasch die Röhre, während das weiße Blatt an seinem Platze bleibt: sofort sehe ich an der Stelle des Loches einen grauschwarzen oder schwarzen Fleck, in welchem zunächst nur wenig oder nichts zu unterscheiden ist. Nachträglich tauchen einzelne Teile des zuvor Gesehenen mit ganz verschwommenen Umrissen aus dem Dunkel auf, aber alle feineren Einzelheiten

bleiben noch unsichtbar. Diese unter Umständen ganz gewaltige Minderung der Deutlichkeit des Sehens von Dingen, deren Lichtstärke nicht kleiner geworden ist, erklärt sich vorwiegend aus der starken Verdunkelung durch Kontrast.

Allerdings erhält das Netzhautbild der durch das Loch sichtbaren Dinge beim Wegnehmen der Röhre einen erheblichen Zuwuchs an falschem Lichte, der den verschiedenen Lichtstärken der einzelnen Teile des Bildes hinzugefügt wird und die relativen Unterschiede ihrer Lichtstärken mindert, was an sich schon eine Minderung ihrer Farbenunterschiede und also auch der Deutlichkeit des Sehens bedingen könnte. Dieser Lichtzuwuchs könnte jedoch nur erhellend wirken, während doch alles durch das Loch Sichtbare vielmehr sehr stark verschwärzt erscheint. Diese Verschwärzung ist eine derartige, dass dadurch die Farbenunterschiede der fraglichen Sehdinge gemindert werden und entsprechend auch die Deutlichkeit des Sehens (vgl. VII. Abschnitt). Der Einfluss der Pupillenänderung lässt sich in der früher beschriebenen Weise ausschließen.

Wer etwa doch der Meinung sein sollte, dass die große Herabsetzung der Sehschärfe, wie sie bei diesem Versuche eintritt, nur durch das von dem weißen Blatte auf das Netzhautbild des Loches abirrende Licht bedingt werde, und dass die Verschwärzung des Loches und der durch dasselbe sichtbaren Dinge lediglich auf eine »Urteilstäuschung« zurückzuführen sei, der betrachte die zuvor durch das Loch sichtbar gewesenen Dinge nach Entfernung des weißen Schirmes durch eine schräg gehaltene unbelegte Spiegelglasplatte, in der sich ein zur Seite gehaltenes gut beleuchtetes weißes Blatt spiegelt. Das gespiegelte Licht legt sich dann wie ein Schleier auf die gesehenen Dinge und mindert ebenfalls ihre Deutlichkeit; aber um sie durch diese Verweißung ihrer Netzhautbilder auch nur angenähert so undeutlich zu machen, bedarf es einer Menge des zugespiegelten Lichtes, welche viel größer ist, als die Menge des falschen Lichtes unter den Bedingungen des obigen Versuches sein konnte.

Ein zwar nicht so auffälliges, aber nicht minder belehrendes Beispiel für die Herabsetzung der Deutlichkeit durch Kontrast ist das folgende: Von einem mit kleinen Buchstaben bedruckten weißen Blatte schneide ich den unbedruckten Rand ab und lege das Blatt so über das in Tischhöhe befindliche lichtlose Loch eines am Fenster stehenden Dunkelkastens, dass das Loch zur Hälfte verdeckt ist. Über dem Loche befindet sich in passender Höhe das früher beschriebene Polariphotometer so orientiert, dass z. B. das extraordinäre Bild über das ordinäre nach rechts hinausragt und zwar für die eben gewählte Sehweite mit einem 16 mm breiten Streifen. Durch passende Stellung des Nicol vermindere ich die Lichtstärke des überragenden Streifens soweit, dass ich die Buchstaben, welche sich nahe seinem rechten, an das Schwarz des Loches grenzenden Rande befinden, eben noch

erkenne: dann sind seine nahe dem linken Rande liegenden Buchstaben bereits unkenntlich, weil sie hier der verdunkelnden Kontrastwirkung des angrenzenden Weiß unterliegen, welches den hier übereinander liegenden beiden Bildern entspricht. Auch sehe ich den Streifen nahe seinem linken Rande merklich schwärzlicher als an seinem rechten Rande, und zwar dies alles auch dann, wenn ich jeden successiven Kontrast ausschließe. Schiebe ich von rechts her ein weißes Blatt soweit über den offenen Teil des Loches, dass der linke Rand seines ordinären Bildes dicht am rechten Rande des eben besprochenen viel lichtschwächeren Streifens erscheint, so werden nun auch die an diesen Rand grenzenden Buchstaben schwerer kenntlich.

Die Verminderung der Deutlichkeit des centralen Sehens infolge von Belichtungen excentrischer Netzhautteile kann also sowohl durch Vermehrung des falschen Lichtes als durch die Wechselwirkung der Sehfeldstellen herbeigeführt werden. Da überdies, ganz abgesehen von dem leicht auszuschließenden Einflusse der Pupillenänderung, der jeweilige Anpassungszustand des inneren Auges bei allen diesen sogenannten Blendungserscheinungen wesentlich mitbestimmend ist, so erklärt sich, dass die verschiedenen Untersucher der letzteren, insbesondere Uhthoff und Depéne (27), Heymans (28), Borschke (29 und 30) zu sehr verschiedenen Ansichten über das Wesen der »Blendung« gelangen konnten.

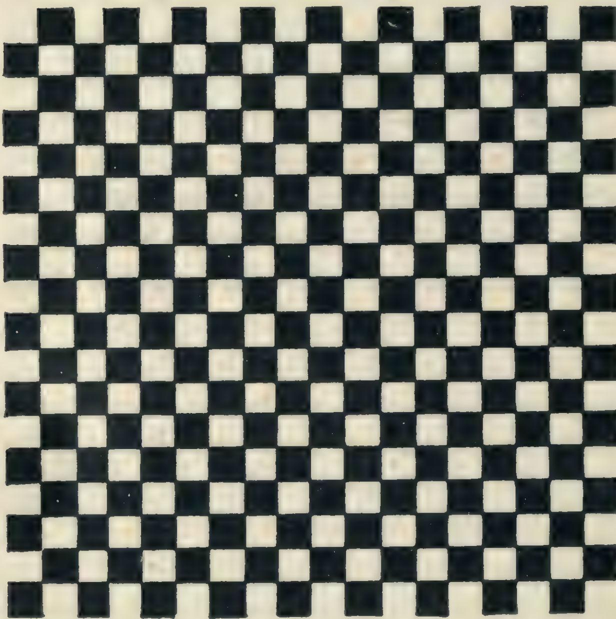
Die Wechselwirkung der Sehfeldstellen und die durch dieselbe bedingte Verschwärzung des centralen Sehfeldbezirkes hat sich in den zuletzt besprochenen Fällen als Ursache einer Verminderung der Sehschärfe gezeigt. Wir werden jedoch weiterhin sehen, in wie hohen Maße beim gewöhnlichen Sehen gerade diese Wechselwirkung unsere Sehschärfe erhöht und die lokale Abirrung des Lichtes unschädlich macht.

§ 36. Die scharfen Umrisse der Sehdinge als Ergebnis der Wechselwirkung der Sehfeldstellen. Dass ein gutes Auge wirklich scharfe Umrisse der Außendinge auch als scharfe sieht, pflegt man auf eine entsprechende Genauigkeit der Netzhautbilder zurückzuführen und schreibt damit dem dioptrischen Apparate des Auges eine Leistung zu, die weit über sein Können hinausgeht. Mancherlei Thatsachen zwingen zu dem Schlusse, dass die Einzelteile des Netzhautbildes auch im besten Auge keineswegs durch so scharfe Grenzen geschieden sind, wie sie die Sehdinge zeigen können.

Wäre es die Genauigkeit des Netzhautbildes, der wir die scharfen Umrisse unseres Sehfeldinhaltes verdanken, so müssten uns bei guter Akkommodation zwei scharf aneinander grenzende Teilstücke des Gesichtsfeldes auch bei Herabsetzung der allgemeinen Beleuchtung solange mit scharfer Grenze erscheinen, als ihre beiden Farben (Helligkeiten) für uns noch deutlich verschieden sind. Denn an der Genauigkeit oder Schärfe

des Netzhautbildes wird durch die Minderung seiner Lichtstärke nichts geändert, falls wir den etwaigen Einfluss einer Pupillenerweiterung dadurch ausschließen, dass wir ein Diaphragma von zureichend kleiner Öffnung dicht vor das Auge bringen. Gleichwohl wirkt auch unter solchen Umständen eine stärkere Herabsetzung der allgemeinen Beleuchtung des Gesichtsfeldes sofort auf unser Sehen der Umrisse ähnlich wie eine mangelhafte Akkommodation. Die vorher scharf gewesenen Grenzlinien der Sehdinge werden dabei immer verwaschener und undeutlicher auch dann, wenn ihre jetzt allerdings verkleinerten Farbenunterschiede noch relativ große und viel größer sind, als die kleinsten Unterschiede von Farben, die uns bei guter Beleuchtung der Außendinge soeben noch durch scharfe Grenzen geschieden erschienen sind.

Fig. 31.



Man bringe dicht vor das Auge ein Diaphragma von 1 bis 2 mm Durchmesser und halte in einem Zimmer, das von einer einzigen Lampe erhellt wird, das Schachbrettmuster der Fig. 31 in deutlicher Sehweite so vor sich hin, dass das volle Licht der nahen Lampe darauf fällt; dann drehe man sich soweit um sich selbst, dass das Muster vom Körper vollständig beschattet und nur noch durch das schwache an den Wänden reflektierte Licht erleuchtet wird. Jetzt wird man kein einziges sauber begrenztes Viereck mehr sehen, sondern nur verwaschene Umrisse, und wenn die Zimmerwände sehr wenig Licht zurückgeben, sogar nur dunkle und helle Flecke, die zwar an Vierecke erinnern, aber weder deutlich gezeichnete Seiten noch scharfe Ecken haben. Ja es kommt bei noch schwächerer Beleuchtung sogar dahin, dass man gar nicht mehr sagen könnte, ob die ganz unsicher umgrenzten schwarzen und weißen Flecke, die man sieht, regelrechte Quadrate oder andere Figuren sind, wenn man sie nicht zuvor bei guter Beleuchtung gesehen hätte.

Hat man ein Dunkelzimmer neben einem gut beleuchteten zur Verfügung, so stelle man sich in ersterem dicht an die offene Thüre, so dass die in der einen Hand gehaltene Figur zunächst voll beleuchtet wird und ganz scharf erscheint, dann schließe man mit der andern Hand die Thüre so

weit, dass nur noch spärliches Licht auf die Figur fällt, und man wird in der bequemsten Weise die soeben beschriebene höchst auffallende Herabsetzung der Deutlichkeit der Umrisse beobachten können.

Der Farbenunterschied zwischen den helleren und dunkleren Teilen der Figur ist bei alledem noch sehr deutlich, nur ihre Grenzen sind es nicht mehr. Das Netzhautbild aber hat unter den gegebenen Bedingungen bei der schwächsten Beleuchtung dieselbe Schärfe wie bei der stärksten.

Aus den jetzt herrschenden Lehren ist nicht zu verstehen, wie bei ungeänderter Schärfe des Netzhautbildes die bloße Herabsetzung seiner Lichtstärke die Grenzen zwischen den hellen und dunklen Teilen des korrelativen Sehfeldes verwaschen und unkenntlich machen kann, obgleich ein ganz deutlicher Helligkeitsunterschied der Felder noch immer vorhanden ist. Nach diesen Lehren könnten allerdings durch die Herabsetzung der Beleuchtung, sobald dabei die untere Gültigkeitsgrenze des Weber'schen Gesetzes überschritten wird, die Helligkeitsunterschiede im Sehfelde abnehmen und also, wenn sie von vornherein klein waren, schwerer bemerklich oder gar unbemerklich werden. Wir haben es aber in Fig. 31 mit einer Sehprobe zu thun, deren Einzelheiten zunächst sehr große[1]) und bei den dann benützten schwachen Beleuchtungen auch noch ganz deutliche Helligkeitsverschiedenheiten zeigen, während doch bei guter Beleuchtung aneinandergrenzende Teile des Sehfeldes, deren Helligkeitsverschiedenheiten sehr viel kleiner sind, noch scharfe Grenzen haben können.

Die Undeutlichkeit der Umrisse bei der herabgesetzten Beleuchtung lässt sich auch nicht aus der »fleckigen Verteilung des Eigenlichtes« (Helmholtz II, S. 409) erklären. Denn bei unserem Versuche ist das Auge zur Zeit der Herabsetzung der Beleuchtung im Zustande einer Daueranpassung für gute Beleuchtung, besonders dann, wenn der Versuch an einem hellen Tage angestellt wird. Die Ungleichheiten und Unstetigkeiten der Eigenfarbe des Auges spielen erst dann eine erhebliche Rolle, wenn dasselbe längere Zeit gar nicht oder äußerst schwach belichtet worden ist und sich die successive Dunkeladaptation bereits entwickelt hat. Von dem centralen relativen Skotome, welches einem solchen dunkeladaptierten Auge eigen ist, bemerkt man nichts bei unserem Versuche. Die indirekt gesehenen Teile der Figur zeigen nicht bessere Umrisse oder auffallend größere Verschiedenheiten zwischen den helleren und dunkleren Stellen als wie die direkt betrachteten. Es ist in dieser Hinsicht sehr belehrend, den Versuch in der oben beschriebenen Weise im Dunkelzimmer anzustellen,

---

1) Die schwarzen Quadrate der Fig. 31 sind, wenn regelmäßig reflektiertes Licht möglichst ausgeschlossen ist, infolge der Glättung des Papieres bedeutend lichtschwächer als es bei derselben Beleuchtung die Buchstaben einer Druckschrift auf einem matten Papiere sind, wie solches früher ausschließlich zum Drucken benutzt wurde.

nachdem man längere Zeit das eine Auge vor jedem Lichte geschützt, das andere aber im gut beleuchteten Raume gebraucht hat. Man vermag dann, während die eine Hand durch Veränderung der Thürspalte die Beleuchtung regelt und die andere die Figur hält, durch Verschluss des hell- oder des dunkeladaptierten Auges bei entsprechend schwachen Beleuchtungen die für beide Augen sehr verschiedenen Erscheinungsweisen der Figur herbeizuführen.

Wenn wir zwei in Wirklichkeit scharf von einander abgegrenzte Felder verschiedener Lichtstärke zwar in deutlich verschiedenen Farben, aber nicht durch eine scharfe Grenzlinie, sondern durch ein Zwischengebiet geschieden sehen, in welchem die hellere Farbe des einen Feldes in die dunklere des anderen übergeht, so muss dies auf die Vermutung führen, dass auch im Netzhautbilde die Lichtstärke des einen Feldes nicht scharf von der des anderen abgesetzt ist, sondern dass ein allmählicher Übergang der einen Lichtstärke in die andere besteht. Bei mangelhafter Akkommodation oder ungewöhnlich weiter Pupille wäre uns dies selbstverständlich. Wenn wir aber trotz guter Akkommodation und zureichend engem Diaphragma doch die Grenzlinie noch verwaschen sehen, obwohl sie sofort scharf erscheint, sobald wir ohne jede Änderung der Akkommodation und des Diaphragmas die Lichtstärke der beiden Felder in demselben Verhältnis vergrößern, so lässt sich dies nur aus einer veränderten Reaktionsweise unseres inneren Auges erklären. Der etwaige Verdacht, dass das Auge bei Herabsetzung der Beleuchtung seine Akkommodation ändere, ist für meine Person schon dadurch ausgeschlossen, dass die Akkommodationsbreite meines presbyopischen Auges nahezu gleich Null ist.

So kommen wir also zu dem Schlusse, dass das Netzhautbild jeder solchen Grenzlinie auch bei bester Akkommodation an sich ein verwaschenes ist, dass aber unser inneres Auge das Vermögen besitzt, auf Grund eines solchen unvollkommenen Linienbildes, bei zureichender Lichtstärke desselben, im psychischen Sehfelde eine scharfe Grenze zwischen den beiden bezüglichen Farben herzustellen und so aus verwaschen umrissenen Teilen des Netzhautbildes scharf umrissene Sehdinge zu schaffen.

Dieses Vermögen verdankt unser Sehorgan der Wechselwirkung der Sehfeldstellen. Das Netzhautbild ist stets verwaschen; gleich dem Photographen aber, der eine mangelhafte Kopie retouchiert, korrigiert die Wechselwirkung das Bild der Außendinge, indem sie dort, wo durch Abirrung Licht verloren geht, den dadurch bedingten Helligkeitsverlust mehr oder minder entsprechend ersetzt, dort aber, wo das abgeirrte Licht fälschlich hingerät, es durch Verdunkelung unschädlich macht. Nicht dem dioptrischen Apparate verdanken wir z. B. die Schwärze und die Deutlichkeit der Umrisse dieser Buchstaben, sondern den Wechselwirkungen im somatischen Sehfelde.

Denken wir uns das Gesichtsfeld als ein Mosaik von Flächenelementen, deren jedes denselben kleinen Gesichtswinkel hat, wie der Querschnitt eines Zapfens der Netzhautgrube, und also zu einem solchen korrelativ ist, so ließe sich theoretisch die Forderung stellen, dass jeder Zapfen nur von dem einen, korrelativen Elemente des Gesichtsfeldes belichtet werde. In Wirklichkeit bestrahlt jedoch infolge der lokalen Abirrung das Licht eines solchen Gesichtsfeldelementes einen ganzen Komplex von Zapfen, und wird ein und derselbe Zapfen stets gleichzeitig von einem ganzen Komplexe jener Gesichtsfeldelemente bestrahlt. Das Licht eines Fixsternes, dessen Gesichtswinkel gleich Null gesetzt werden darf, sammelt sich im Auge nicht in einem Punkte, sondern in einem kleinen Raume, welcher selbst bei bester Akkommodation von der Empfangsfläche der Netzhaut in einer kleinen Fläche durchschnitten wird, die auch im günstigsten Falle viel größer ist, als der Querschnitt eines Zapfens. Auch fordert das, was wir über die Grenzen des Auflösungsvermögens (32, S. 16) unseres Sehorgans wissen, durchaus nicht, dass das von einem »Punkte« der Außenwelt kommende Licht wieder in einem »Punkte« oder auch nur in einem Sammelraume vom Querschnitt eines Zapfens vereinigt werde.

Unsere Erfahrungen z. B. über den kleinsten Gesichtswinkel des gegenseitigen Abstandes zweier lichter Punkte auf finsterem Grunde, die wir eben noch räumlich zu sondern vermögen, verlangen freilich, dass derjenige Zapfen, welcher im Mittelpunkte der von einem leuchtenden Außenpunkte bestrahlten Zapfengruppe liegt, wesentlich stärker belichtet sei als seine nächsten Nachbarn. Wenn aber die zwei, den beiden Außenpunkten entsprechenden stärkst bestrahlten Zapfen einen Zapfen zwischen sich haben, dessen Belichtung auch nur ein wenig schwächer ist, als ihre eigene, so wird für den Beobachter zwischen zwei helleren Stellen eine minder helle Stelle bemerklich werden können, womit eine räumliche Sonderung der ersteren gegeben ist.

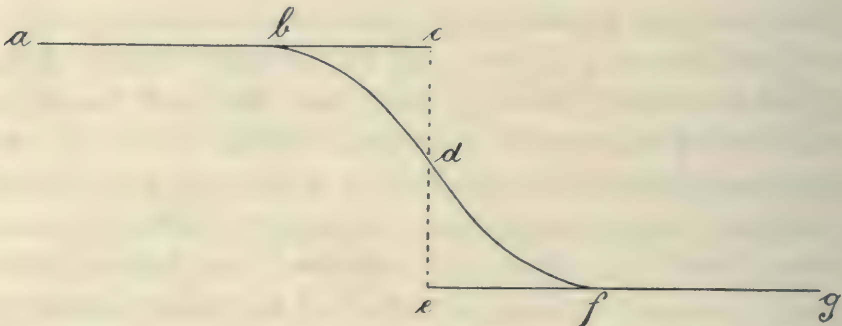
Da sich nicht feststellen lässt, wie groß das von einem Flächenelemente des Gesichtsfeldes infolge lokaler Abirrung bestrahlte Feld auf der Empfangsfläche der Netzhaut ist, und in welcher Weise z. B. das von jenem Elemente ausgehende Licht sich innerhalb der von ihm bestrahlten Gruppe von Zapfen um den mittleren stärkst bestrahlten verteilt, so müssen wir uns mit einer schematischen Erwägung der Frage begnügen, in welcher Weise trotz der ungenauen Abbildung der Außendinge die scharfen Umrisse der Sehdinge zu stande kommen können.

Denken wir uns mit Helmholtz für jeden Punkt der von der Außenwelt bestrahlten Netzhautfläche die Stärke des ihn treffenden Lichtes durch eine, dieser Stärke proportionale Ordinate ausgedrückt, so wird durch die Gesamtheit dieser Ordinaten eine Fläche bestimmt, welche wir mit E. Mach als die Lichtintensitätsfläche oder Lichtfläche des Netzhautbildes

bezeichnen können. Ein gleichmäßig lichtstarkes ebenes Außenfeld, welches durch eine scharfe Grenze von einem ganz finsteren Felde geschieden wäre, würde bei streng stigmatischer Vereinigung der von einem Punkte des ersteren Feldes kommenden Lichtes auf der als Ebene gedachten Empfangsfläche eine zu derselben parallele Lichtfläche geben, deren Durchschnitt in Fig. 32 durch die Gerade *abc* dargestellt sei. Wenn aber in Wirklichkeit jedem kleinsten Elemente des Außenfeldes ein kleiner Lichthügel mit relativ breiter Basis entspricht, so wird sich aus der Summation dieser elementaren Lichthügel auf der Netzhaut eine Lichtfläche ergeben, deren Querschnitt beispielsweise der Kurve *abdf* entsprechen möge. Das Licht, welches theoretisch genommen die leere Ecke *bcd* zu füllen hätte, erfüllt dann als falsches Licht die Ecke *def*.

Ganz ähnlich wird es sich verhalten, wenn ein lichtstärkeres Außenfeld an ein zwar nicht lichtloses, aber lichtschwächeres grenzt. Statt dass im Punkte *c* die höhere Lichtfläche *abc* des Netzhautbildes senkrecht zu

Fig. 32.



der niederen *efg* abfällt, sinkt sie entsprechend der Kurve *bdf* nur allmählich zu derselben hinab. Doch sei ausdrücklich betont, dass diese willkürlich entworfene Kurve höchstens insofern der Wirklichkeit entsprechen könnte, als sie anfangs langsam, dann schneller und schließlich wieder langsamer absinkt.

Erinnern wir uns jetzt des in § 32 über den simultanen Grenzkontrast Mitgeteilten, wobei es sich ebenfalls um je zwei aneinander grenzende Flächen verschiedener Lichtstärke handelte, aber die lokale Abirrung des Lichtes noch nicht berücksichtigt zu werden brauchte. Wir sahen dort, dass die lichtstärkere Fläche nach der Grenze hin wegen des hier besonders starken Kontrastes eine ansteigende, die lichtschwächere eine absinkende Helligkeit zeigen kann. Obgleich sich dies hauptsächlich als eine Folge des Nachkontrastes erwies, so fand es sich doch zuweilen unter besonders günstigen Umständen auch bei Ausschluss jeder Blickbewegung und daher als eine alleinige Folge der Wechselwirkung. Wenn aber im Netzhautbilde, wie soeben auseinandergesetzt wurde, infolge lokaler Abirrung die

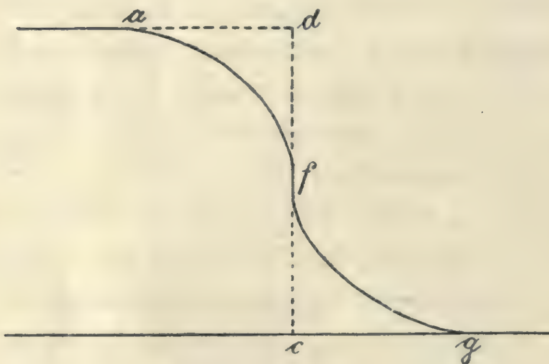
Lichtstärke der lichtstärkeren Fläche in Wirklichkeit nach der Grenzlinie hin abnimmt und die der lichtschwächeren Fläche zunimmt, so müsste auch im Sehfelde die erstere Fläche eine nach der Grenze hin abnehmende und die andere Fläche eine zunehmende Helligkeit zeigen, falls dies nicht durch die Wechselwirkung der beiden Grenzbezirke vereitelt würde. Da diese auf die Helligkeiten entgegengesetzt wirkt, als wie die lokale Abirrung des Lichtes, so werden durch sie die Folgen der letzteren mehr oder weniger kompensiert. Könnte dies zureichend genau der Fall sein, so würden uns die beiden Flächen in der Nähe ihrer Grenze etwa ebenso erscheinen, wie es der Fall sein müsste, wenn es weder eine Abirrung des Lichtes noch eine Wechselwirkung der Sehfeldstellen gebe. Das der Ecke *bcd* (Fig. 32) entsprechende Defizit an Licht im Netzhautbilde würde im Sehfelde durch einen entsprechenden Zuwuchs an Helligkeit, der der Ecke *def* entsprechende falsche Lichtzuwuchs durch einen negativen Helligkeitszuwuchs oder einen Dunkelheitszuwuchs kompensiert. Übersteigt jedoch der Einfluss der Wechselwirkung das Ausmaß der Abirrung des Lichtes, so ergiebt sich die in § 32 beschriebene Erscheinung eines simultanen Grenzkontrastes, d. h. eine nach der Grenzlinie hin zunehmende Helligkeit des lichtstärkeren und eine abnehmende des lichtschwächeren Feldes. Wenn dagegen infolge zu schwacher Beleuchtung und entsprechend geringer Größe der absoluten Lichtstärken das Ausmaß der Wechselwirkung zur beiläufigen Kompensation unzureichend wird (vgl. den VII. Abschnitt), so treten die Folgen der Abirrung des Lichtes mehr und mehr hervor und es zeigt sich eine nach der Grenzlinie hin abnehmende Helligkeit der lichtstärkeren und eine zunehmende der lichtschwächeren Fläche; die beiden Helligkeiten gehen sehr allmählich ineinander über, und ihre Grenze ist also verwaschen, wie sich dies auch bei unserem Versuche an dem Schachbrettmuster zeigte.

Für die allgemein verbreitete Ansicht, dass die scharfen Umrisse der Sehdinge der Schärfe des Netzhautbildes zu danken sind, wird man vielleicht auch die Autorität von Helmholtz anführen wollen. Allerdings sagt derselbe (I, S. 215; II, S. 255): »Es können lichte Punkte wahrgenommen werden, deren Netzhautbild sehr viel kleiner ist, als ein empfindendes Netzhautelement« und beruft sich dabei auf die Fixsterne. Wollte man diese Bemerkung wörtlich nehmen, so stände sie in auffallendem Widerspruche damit, dass Helmholtz selbst die Größe des Zerstreuungskreises zu berechnen versucht hat, welche ein mit gemischtem Lichte leuchtender Außenpunkt infolge der chromatischen Aberration auf der Netzhaut erzeugt, wenn das Auge für die »grüngelben Strahlen« akkommodiert ist. Es ergab sich ihm ein Durchmesser des Zerstreuungskreises von 0,0426 mm, der also »fast zehnmal größer ist als (nach damaliger Annahme) die Dicke der Zapfen« (I, S. 216; II, S. 257). Das Netzhautbild eines Fixsternes, das »sehr viel kleiner« sein sollte als der Durchschnitt eines Zapfens, war also nur eine theoretische Fiktion. Richtig aber bleibt trotzdem, dass Helmholtz die Genauigkeit des Netzhautbildes sehr überschätzte. Dass von einem monochromatisch leuchtenden Flächenelemente, dessen Gesichtswinkel

gleich dem eines Zapfenquerschnittes ist, bei vollkommener Akkommodation ein einziger Zapfen ausschließlich beleuchtet werden könne, hat er offenbar für möglich gehalten. Dass dies aber in Wirklichkeit nicht der Fall ist, geht daraus hervor, dass man das Undeutlichwerden der Konturen bei Herabsetzung der Beleuchtung in der oben beschriebenen Weise auch dann wahrnimmt, wenn man durch Farbenfilter blickt, welche ein angenähert monochromatisches Licht durchlassen. Das Gesichtsfeld muss dabei anfangs intensiv beleuchtet sein, entweder durch die unverhüllte Sonne oder ein sehr starkes künstliches Licht. Die chromatische Aberration macht also das Netzhautbild nicht viel verwaschener, als es schon bei monochromatischer Beleuchtung ist.

Nach der Berechnung von Helmholtz würde infolge der chromatischen Aberration die Lichtfläche des Netzhautbildes einer gleichmäßig lichtstarken Außenfläche an ihrem Rande den in Fig. 33 durch die Kurve *afg* wiedergegebenen Querschnitt haben (1, S. 135; 2, S. 167). Er geht dabei von der Voraussetzung aus, dass alle Strahlen gleicher Wellenlänge eines Außenpunktes sich im Auge wieder in einem Punkte vereinigen, und zwar die Strahlen mittlerer Wellenlänge auf der für die Wahrnehmung des Lichtes wesentlichen Fläche der Netzhaut, die ich oben als Empfangsfläche bezeichnete, die Strahlen kleinerer Wellenlänge vor, diejenigen größerer Wellenlänge hinter dieser Fläche, so dass sie auf dieser Zerstreuungskreise bilden. Die Kurve *afg* hat die Eigentümlichkeit, »dass sie in ihrer Mitte bei *f*, entsprechend dem wirklichen Orte des Randes, ganz steil abfällt«. »Dieser plötzliche Abfall der Helligkeit[1]) am Rande der Fläche macht« nach Helmholtz »für das Auge die Lage des Randes scharf erkennbar, wenn auch eine gewisse Menge Licht sich noch weiter verbreitet.«

Fig. 33.



Hierzu bemerkte schon E. Mach, dass er nach seinen Erfahrungen über Kontrastwirkungen »auch noch den Übergang (der Lichtfläche) von konkav zu konvex und den Wendepunkt bei *f* für sehr wesentlich halte« (vgl. § 32, S. 140). Damit hat er zuerst darauf hingewiesen, dass die Wechselwirkung der Sehfeldstellen einen wesentlichen Anteil an der Bildung der Umrisse der Sehdinge hat. Er lässt dabei freilich die von Helmholtz angenommene stigmatische Vereinigung der von einem Außenpunkte kommenden Strahlen gleicher Wellenlänge gelten, so dass für das Sehen bei monochromatischer Beleuchtung diese Wechselwirkung betreffs der Konturenbildung keine wesentliche Rolle mehr spielen, sondern nur die S. 136 beschriebene Erscheinung eines Grenzkontrastes bewirken könnte. Ich glaube im Obigen gezeigt zu haben, dass dem Gedanken Mach's eine viel umfassendere Bedeutung zukommt.

Nach der Darstellung von Helmholtz würde von der theoretisch geforderten, senkrecht abfallenden Seitenwand *dc* der Lichtfläche trotz der chromatischen Aberration doch noch der mittlere Teil (bei *f*) erhalten und als scharfe Grenze sichtbar sein, und nach Mach hätte dann der Kontrast nur noch die

1) Unter Helligkeit versteht Helmholtz hier die Lichtstärke.

Abstumpfung der beiden Kanten zu korrigieren. Nach meiner Auffassung aber wird der Ort der im Abirrungsgebiet erscheinenden Grenze durch die Wechselwirkung mitbestimmt. Daher dieser Ort nicht notwendig mit dem theoretischen Orte der Grenzlinie zusammenfällt, sondern je nach den Umständen bald nach der einen, bald nach der anderen Seite davon abweicht, und bald die lichtstärkere, bald die lichtschwächere Fläche auf Kosten der anderen vergrößert erscheint.

VII. Abschnitt.

Zur Theorie der Wechselwirkung im somatischen Sehfelde.

§ 37. Das Gesetz der Induktion. Wenn die Helligkeit bezw. Dunkelheit einer tonfreien Farbe des psychischen Sehfeldes von dem Verhältnisse zwischen der an korrelativer Stelle der Sehsubstanz bestehenden Dissimilation und Assimilation abhängt, so kann ein Hellerwerden der Farbe ebensowohl durch Steigerung der Dissimilation bei gleichbleibender Assimilation, als durch Minderung der letzteren bei unveränderter Dissimilation, als endlich auch durch eine passende gleichzeitige Änderung beider Komponenten des Stoffwechsels bedingt sein. Analoges gilt mutatis mutandis für ein Dunklerwerden der Farbe. Schon deshalb wäre die Verdunkelung oder Erhellung einer Sehfeldstelle durch Nebenkontrast in sehr verschiedener Weise denkbar, wenn man die Kontrasterscheinungen ohne gleichzeitige Berücksichtigung der übrigen Leistungen des Lichtsinnes betrachten wollte. Je mehr man aber auch diese, die mit der Beleuchtungsstärke des Gesichtsfeldes wachsende Deutlichkeit und Eindringlichkeit des Sehfeldinhaltes, die Simultananpassung, die Nachbilderscheinungen u. s. w. mit in Betracht zieht, desto mehr engt sich der Kreis der hier von vornherein denkbaren Annahmen ein. Es würde viel Raum erfordern, wenn ich alle von mir auf ihre Brauchbarkeit durchprüften Hypothesen mitteilen bezw. ihre Zurückweisung begründen wollte. Ich muss mich begnügen, eine Hypothese zu erörtern, welche das Wesentliche der hierher gehörigen Erscheinungen kurz zusammenzufassen, die einzelne Erscheinung daraus abzuleiten und das ganze Gebiet auch rechnerisch zu behandeln gestattet.

Diese Hypothese geht davon aus, dass der Stoffwechsel jedes Einzelteiles oder Elementes der Sehsubstanz auch den Stoffwechsel seiner Umgebung mit beeinflusst, indem die Änderung des ersteren eine gegensinnige Änderung des letzteren herbeiführt; dass demgemäß auch umgekehrt der Stoffwechsel jedes Elementes mitbestimmt wird durch den jeweiligen Stoffwechsel seiner Umgebung. Unter Umgebung eines Elementes ist hier das übrige Sehfeld insoweit zu verstehen, als sich in demselben die mit der Entfernung abnehmende Wirkung des Elementes noch merklich erstreckt, kurz der ganze Wirkungskreis des letzteren. Jedes innerhalb dieses

Gebietes liegende Element vermag umgekehrt auch auf das erstgenannte Element zu wirken.

Das Maßgebende für die Wirkung eines Elementes der Sehsubstanz auf die Umgebung ist die Größe des Unterschiedes zwischen seiner gleichzeitigen Dissimilation und Assimilation. Jedes Element, dessen Dissimilation größer ist als seine Assimilation ($D > A$), induziert in seiner Umgebung einen Zuwuchs zu derjenigen Assimilation, welche ohnedies hier stattfinden würde; jedes Element, dessen Assimilation größer ist als seine gleichzeitige Dissimilation ($D < A$), induziert in der Umgebung einen Zuwuchs zu der daselbst anderweitig bedingten Dissimilation. Hiermit soll zugleich ausgesprochen sein, dass ein Element der Sehsubstanz, in welchem Dissimilation und Assimilation gleichgroß sind, und also die Sehsubstanz unverändert verharrt, auch keinerlei Wirkung auf den Stoffwechsel der Umgebung hat.

Die induzierte Wirkung ist in unmittelbarer Nähe des induzierenden Elementes, also in den nächsten Nachbarelementen am stärksten, nimmt mit dem Abstande vom ersteren nach einem nicht näher bekannten Gesetze rasch ab, erstreckt sich aber vielleicht, wenn auch nicht sicher nachweisbar, bis an die Grenzen des Sehfeldes.

Aus dem Gesagten folgt, dass die Farbe des psychischen Sehfeldes in der Nähe einer Farbe von übermittler Helligkeit ($W > S$) schwärzlicher (minder hell bezw. dunkler), in der Nähe einer Farbe von untermittler Helligkeit ($W < S$) aber weißlicher (heller bezw. minder dunkel) ist, als ohne die erwähnte Induktion der Fall sein würde, während die Farbe von genau mittler Helligkeit ($W = S$), das mittle Grau, ohne Einfluss auf die Farbe der Umgebung ist.

Der D- oder A-Überschuss ist, wie im § 24 besprochen wurde, trotz gleicher Qualität ($D : A$) der Farbe bei verschiedenem Gewichte ($D + A$) derselben verschieden groß. Hieraus folgt, dass die Stärke der Induktion nicht lediglich durch die Helligkeit oder Dunkelheit der induzierenden Farbe, sondern auch durch das Gewicht derselben mit bestimmt wird. Bei gleichem Gewichte wirkt allerdings eine Farbe um so stärker induzierend auf ihre Umgebung, je näher auf der ideellen Farbenlinie ihre Helligkeit dem absoluten Weiß, bezw. ihre Dunkelheit dem absoluten Schwarz liegt; bei gleicher Qualität (Helligkeit bezw. Dunkelheit) der Farbe aber wächst die Stärke der Induktion direkt proportional mit dem Gewichte der Farbe.

Nach der üblichen Auffassung könnte von einer Kontrastwirkung nur zwischen zwei nach Helligkeit oder Dunkelheit verschiedenen Farben die Rede sein. Dementsprechend suchte Helmholtz die hierher gehörigen Erscheinungen zu einem großen Teile daraus zu erklären, dass »wir geneigt sind, diejenigen Unterschiede, welche in der Anschauung deutlich und sicher wahrzunehmen sind, für größer zu halten als solche, welche entweder in

der Anschauung nur unsicher heraustreten oder mit Hilfe der Erinnerung beurteilt werden müssen« (1, S. 392 und 2, S. 543). Aber schon im § 28 haben uns die Thatsachen zu dem Schlusse geführt, dass auch gleichhelle tonfreie Farben sich gegenseitig beeinflussen können, weshalb es passender erschien, statt von Kontrast zwischen zwei Farben, von einer Wechselwirkung derselben zu sprechen. Die soeben gemachte und im folgenden noch weiter zu begründende Annahme, dass nicht nur die Helligkeit der tonfreien Farben, sondern auch ihr Gewicht, welches doch auf die Helligkeit derselben keinen Einfluss hat, den sogenannten Helligkeitskontrast mit bestimmen kann, nötigt uns vollends, den Begriff der Kontrastwirkung hier viel weiter zu fassen, als dies üblicherweise geschieht. Demgemäß spreche ich unter Benutzung einer schon von Brücke angewandten Bezeichnung von einer Induktion statt von einem simultanen Kontraste[1].

Da jeder negative Zuwuchs, den die Dissimilation eines Elementes durch Induktion seitens seiner Umgebung erfährt, mit einem gleichzeitigen positiven Zuwuchs zur Assimilation verbunden ist, so wirkt hier die Induktion auf doppelte Weise verdunkelnd, kurz gesagt als eine Dunkelinduktion. Erhält dagegen die Dissimilation des Elementes durch Induktion einen positiven Zuwuchs, womit sich stets ein negativer Zuwuchs zur Assimilation verbindet, so bedingt dies auf doppelte Weise eine Erhellung der Farbe und es besteht dann eine Hellinduktion.

Der induzierte negative Zuwuchs zur Dissimilation ist nach meiner Annahme unter normalen Verhältnissen gleich groß wie der gleichzeitige positive Zuwuchs zur Assimilation, und ebenso ist der positive D-Zuwuchs gleich dem negativen A-Zuwuchs. Dabei ist also vorausgesetzt, dass alle übrigen Bedingungen eines normalen Verlaufes der Dissimilation und Assimilation erfüllt sind (vgl. § 24 S. 110—111).

Jeden durch Induktion bedingten negativen oder positiven Zuwuchs zur Dissimilation oder Assimilation will ich im folgenden als ein Indukt bezeichnen.

Das in einem Elemente e der Sehsubstanz eben bestehende Indukt ist das summarische Ergebnis der unzählbaren gleichzeitigen Wechselwirkungen, die zwischen diesem Elemente einerseits und sämtlichen Elementen seiner Umgebung andererseits stattfinden. Je nachdem in einem der letzteren ein

---

1) In den Zeilen 6—10 der vorigen Seite (bzw. der letzten Seite der II. Lieferung dieser Grundzüge) fehlen die im folgenden berichtigten Texte gesperrt gedruckten Worte: »Jedes Element, dessen Dissimilation größer ist als seine Assimilation ($D > A$), induziert in seiner Umgebung einen positiven Zuwuchs zu derjenigen Assimilation und einen negativen zu derjenigen Dissimilation, welche ohnedies hier stattfinden würde; jedes Element, dessen Assimilation größer ist als seine gleichzeitige Dissimilation ($D < A$), induziert in der Umgebung einen positiven Zuwuchs zu der daselbst anderweit bedingten Dissimilation und einen negativen zur Assimilation.«

D-Überschuss ($D > A$) oder ein A-Überschuss ($D < A$) besteht, ist das durch die Wechselwirkung zwischen ihm und dem Elemente e in letzterem erzeugte Einzelindukt ein Dunkel- oder ein Hellindukt. Da in der Umgebung eines Elementes hell- und dunkelinduzierende Elemente gleichzeitig vorhanden sein können, die in entgegengesetztem Sinne auf den Stoffwechsel des Elementes induzierend wirken und sich deshalb mehr oder weniger in ihrer Wirkung aufheben, so hat man sich das aus allen diesen Einzelindukten erwachsende Gesamtindukt als die algebraische Summe sämtlicher Einzelindukte zu denken. Dasselbe möge mit J bezeichnet werden.

Jedes Indukt, welches einen negativen Zuwuchs zur Dissimilation oder zur Assimilation bedingt, lässt sich als etwas die Dissimilation bzw. Assimilation minderndes, jedes einen positiven Zuwuchs bedingende Indukt als etwas den bezüglichen Teilprozess des Stoffwechsels förderndes auffassen. Steht einer dieser beiden Prozesse eines Elementes gleichzeitig unter einem solchen mindernden und einem fördernden Einflusse, so heben sich die letzteren teilweise oder im besonderen Falle ganz auf. Für die Rechnung verhalten sie sich daher wie negative und positive Größen, und ihre algebraische Summe ergiebt den tatsächlichen Wert des für das fragliche Element geltenden Gesamtinduktes J. Ehe aber dieses Gesamtindukt rechnerisch verwertet werden kann, ist es nötig, die Wechselwirkung zwischen nur zwei, vom ganzen übrigen Sehfelde unabhängig gedachten Elementen der Sehsubstanz theoretisch zu erörtern, was im nächsten Paragraphen geschehen soll.

Jeder in einem Elemente der Sehsubstanz bestehende D-Überschuss bedingt eine absteigende Änderung der Wertigkeit des Elementes (vgl. § 23 S. 104). Daher besagt das oben ausgesprochene Gesetz der Induktion zugleich, dass jede absteigende Änderung eines Elementes einer in seiner Umgebung anderweit bedingten absteigenden Änderung entgegenwirkt und dieselbe entweder nur verlangsamt oder zum Stillstand bringt oder dieselbe sogar in eine aufsteigende verwandelt, eine in der Umgebung schon bestehende aufsteigende Änderung aber beschleunigt, bezw. eine solche hervorruft, wenn an und für sich Gleichgewicht zwischen Dissimilation und Assimilation bestehen würde. Das Analoge gilt mutatis mutandis für ein induzierendes Element, in welchem ein A-Überschuss und also eine aufsteigende Änderung stattfindet.

Man könnte das Grau, welches dem Gleichgewichte zwischen Dissimilation und Assimilation entspricht als die tonfreie Mittelfarbe, jede hellere Farbe als eine helle im engeren Sinne, jede dunklere Farbe als eine dunkle im engeren Sinne bezeichnen. Die eine Hälfte der tonfreien Farbenreihe würde hiernach sämtliche »helle«, die andere Hälfte sämtliche »dunkle« Farben enthalten. Jeder absteigenden Änderung einer Stelle des Sehsubstanzfeldes entspräche also an der korrelativen Stelle des psychischen Sehfeldes eine »helle«, jeder aufsteigenden Änderung eine »dunkle« Farbe der tonfreien Farbenreihe. Demnach verwandelt die Hellinduktion eine helle Farbe

in eine minderhelle oder in die Mittelfarbe oder sogar in eine dunkle, und von der Dunkelinduktion gilt das Gegenteil.

Wie es möglich wird, dass der Stoffwechsel einer Stelle des somatischen Sehfeldes je nach seiner Art und Größe mitbestimmend wirkt auf Art und Größe des Stoffwechsels der Umgebung, wissen wir nicht. Als ein anatomisches Substrat für die Bahnen solcher Wirkung bietet sich uns sowohl im Gehirn als in der Netzhaut der histologische Zusammenhang ihrer Nervenelemente dar. Auf einen solchen hat bereits im Jahre 1865 E. MACH hingewiesen, als er sich auf Grund seiner Kontrastversuche der Annahme einer Wechselwirkung der Netzhautstellen anschloss (13, I. S. 317).

Vorerst handelt es sich aber noch nicht darum, diese Wechselwirkung selbst zu erklären, sondern darum, aus der Annahme einer solchen die Thatsachen zu erklären. Es war also zunächst das Gesetz zu suchen, nach welchem die somatischen Sehfeldstellen sich gegenseitig in ihrem Lebensprozesse als dem physischen Korrelate der Farben beeinflussen. Der besonders von HELMHOLTZ gemachte Versuch, die hierher gehörigen Thatsachen ohne Rücksicht auf das somatische Geschehen unter ein brauchbares Gesetz zu bringen, ist gescheitert.

§ 38. **Die gegenseitige Induktion zweier Elemente der Sehsubstanz.** Nach unserer Annahme ist der gegenseitige Abstand zweier Empfangselemente der Netzhaut maßgebend für die gegenseitige Abhängigkeit der denselben zugeordneten Elemente der Sehsubstanz, derart dass mit jenem Abstande diese Abhängigkeit nach einem uns unbekannten Gesetze abnimmt. Jedem räumlichen Abstande zweier Empfangselemente der Netzhaut entspricht sozusagen ein bestimmter funktioneller Abstand der zugeordneten Elemente der Sehsubstanz.

Wir wollen uns zunächst zwei Elemente e und $\boldsymbol{e}$ von gleichem Gehalt an Sehsubstanz denken, die zwar untereinander in Wechselwirkung ständen, aber von dem Geschehen in allen übrigen Elementen des Sehsubstanzfeldes ganz unabhängig wären, und wollen die jeweilige Größe ihrer Dissimilation mit D und $\boldsymbol{D}$, die der Assimilation mit A und $\boldsymbol{A}$ bezeichnen. Der durch $D-A$ ausgedrückte Überschuss oder Unterschied im Elemente e induziert in $\boldsymbol{e}$ das Indukt $\boldsymbol{i}$, der Überschuss oder Unterschied $\boldsymbol{D}-\boldsymbol{A}$ im Elemente $\boldsymbol{e}$ induziert in e das Indukt i.

Die tonfreie Dissimilation und Assimilation finden gleichzeitig in derselben Substanz statt und sind also nicht derart gegensätzlich, dass das Bestehen der einen das gleichzeitige Bestehen der anderen ausschlösse. Wohl aber schließt selbstverständlich ein eben bestehender D-Überschuss einen gleichzeitigen A-Überschuss aus und umgekehrt. Dementsprechend kann man zwar zu rechnerischem Zwecke einen D-Überschuss als einen positiven, einen A-Überschuss als einen negativen Überschuss oder Unterschiedswert bezeichnen und auf diese Weise Gleichungen entwickeln, welche für Dunkel- und Hellinduktion zugleich gelten, nicht aber darf man die Assimilation selbst als eine negative Dissimilation in die Rechnung einführen.

Die Größe des Induktes i oder $\boldsymbol{i}$ ist nach meiner Annahme unter normalen Umständen der des induzierenden Überschusses (Unterschiedes) direkt proportional und beträgt einen, je nach dem gegenseitigen Abstande der beiden Elemente verschiedenen, äußerst kleinen Bruchteil des induzierenden Überschusses. Dieser bei gegebenem Abstande konstante Bruchteil möge als der für den funktionellen Abstand der beiden Elemente gültige Induktionskoeffizient mit k bezeichnet werden. Dementsprechend ist

$$\text{im Elemente } e: \quad i = k\,(\boldsymbol{D} - \boldsymbol{A}) \qquad\qquad \text{im Elemente } \boldsymbol{e}: \quad \boldsymbol{i} = k\,(D - A) \qquad (1)$$

Die Dissimilation und Assimilation eines Elementes würde, wenn es keine Induktion gäbe, nur durch seine Wertigkeit und den jeweiligen D-Reiz bestimmt sein, wie dies in § 23 dargelegt wurde. Es wurde dort die lediglich von der Wertigkeit abhängige autonome Dissimilation eines Sehsubstanzelementes mit δ, seine autonome Assimilation mit α bezeichnet. Die autonome Dissimilation drückte zugleich die jeweilige D-Erregbarkeit des Elementes gegenüber einem D-Reize aus, und es ließ sich deshalb der Zuwuchs, den die autonome Dissimilation durch den Reiz r erhält, gleich δr setzen[1]). Wären also die beiden Elemente e und $\boldsymbol{e}$ in ihrem Stoffwechsel voneinander unabhängig, so würden für ihre Dissimilation und Assimilation folgende Gleichungen gelten:

$$D = \delta + \delta r \qquad\qquad \boldsymbol{D} = \boldsymbol{\delta} + \boldsymbol{\delta r}$$
$$A = \alpha \qquad\qquad \boldsymbol{A} = \boldsymbol{\alpha}$$

Infolge der gegenseitigen Induktion ändern sich diese Werte der Dissimilation und Assimilation, und wir müssen die Indukte i und $\boldsymbol{i}$ mit in Rechnung bringen. Demnach ist

$$\left.\begin{aligned} D &= \delta + \delta r - \boldsymbol{i} \qquad\qquad & \boldsymbol{D} &= \boldsymbol{\delta} + \boldsymbol{\delta r} - i \\ A &= \alpha + \boldsymbol{i} & \boldsymbol{A} &= \boldsymbol{\alpha} + i \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

$$D - A = \delta - \alpha + \delta r - 2\,\boldsymbol{i} \qquad\qquad \boldsymbol{D} - \boldsymbol{A} = \boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\delta r} - 2\,i$$

Aus diesen Gleichungen und den oben angeführten Gleichungen (1)

$$i = k\,(\boldsymbol{D} - \boldsymbol{A}) \qquad\qquad \boldsymbol{i} = k\,(D - A)$$

lässt sich der Wert von i bezw. $\boldsymbol{i}$ ableiten, dem ich im Hinblick auf Späteres folgenden Ausdruck geben will:

$$\left.\begin{aligned} i &= \frac{k}{1 - 4\,k^2}\left[(\boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\alpha} - 2\,k(\delta - \alpha)\right] + \frac{k}{1 - 4\,k^2}\,(\boldsymbol{\delta r} - 2\,k\,\delta r) \\ \boldsymbol{i} &= \frac{k}{1 - 4\,k^2}\left[(\delta - \alpha - 2\,k(\boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\alpha})\right] + \frac{k}{1 - 4\,k^2}\,(\delta r - 2\,k\,\boldsymbol{\delta r}) \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

Innerhalb der Grenzen der normalen Stoffwechselbedingungen lässt sich, wie in § 23 besprochen wurde, die Summe der autonomen Dissimilation und

1) δ ist hier nicht als Variationszeichen, sondern als Faktor anzusehen.

Assimilation eines Sehsubstanzelementes als eine Konstante betrachten, die ich behufs bequemer Darstellung gleich 2 setzte. Hiernach ist die jeweilige Wertigkeit der Sehsubstanz schon durch den Wert von δ oder α allein gekennzeichnet, und man kann in obiger Gleichung $\delta - \alpha$ durch $2\ (\delta - 1)$ und $\boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\alpha}$ durch $2\ (\boldsymbol{\delta} - 1)$ ersetzen. Diese sowie die anderen möglichen Umformungen der Gleichungen lasse ich unberücksichtigt.

Wären also die Wertigkeiten und die Reize der beiden Elemente e und $\boldsymbol{e}$ sowie der für ihren funktionellen Abstand geltende Induktionskoeffizient k gegeben, so ließe sich aus obigen Gleichungen für jedes der beiden Elemente die Größe seines Induktes ableiten.

Auf Grund der Gleichungen (2)

$$D = \delta + \delta r - i \qquad \boldsymbol{D} = \boldsymbol{\delta} + \boldsymbol{\delta} \boldsymbol{r} - \boldsymbol{i}$$
$$A = \alpha + i \qquad \boldsymbol{A} = \boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{i}$$

würden sich dann auch die Größen der Dissimilation und Assimilation jedes Elementes und daraus wieder (vgl. § 22 S. 103) die tonfreien Farben und Helligkeiten der zugehörigen Stellen des psychischen Sehfeldes ergeben.

Je nachdem aus Gleichung (3) für das Indukt i ein positiver oder negativer Wert folgt, bestände für das Element e eine Dunkel- oder eine Hellinduktion. Ist nämlich i eine negative Größe, so ergiebt sich, dass

$$D = \delta + \delta r - (-i)$$
$$A = \alpha + (-\mathrm{i})$$

und dass also die Dissimilation einen positiven, die Assimilation einen negativen Zuwuchs durch die Induktion erhält, woraus für die korrelative Farbe ein Helligkeitszuwuchs folgt. Das Analoge gilt für das Element $\boldsymbol{e}$.

Wie die Gleichung (3) lehrt, setzt sich der Wert des Induktes i (bezw. $\boldsymbol{i}$) aus zwei Teilen zusammen, deren erster, im folgenden mit i_0 bezeichneter, das endogene Teilindukt genannt werden kann, weil er, abgesehen von dem Induktionskoeffizienten k, nur von der, durch die Wertigkeit bedingten Größe der autonomen Dissimilation und Assimilation der beiden Elemente abhängt. Wenn das Auge ganz unbelichtet, und also die Reize r und $\boldsymbol{r}$ gleich Null wären, so würde dieses endogene Teilindukt allein die Größe des Induktes i bestimmen. Für das unbelichtete Auge wären also

$$\left.\begin{aligned} i = i_0 &= \frac{k}{1 - 4k^2}\left[(\boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\alpha} - 2k(\delta - \alpha)\right] \\ \boldsymbol{i} = \boldsymbol{i}_0 &= \frac{k}{1 - 4k^2}\left[(\delta - \alpha - 2k(\boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\alpha})\right] \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

und für den Fall, dass beide Elemente dieselbe Wertigkeit hätten, wäre

$$i_0 = \boldsymbol{i}_0 = \left(\frac{k}{1 + 2k}\right)(\delta - \alpha)$$

Das endogene Indukt wäre also in beiden Elementen gleich und proportional zum Unterschiedswerte $\delta - \alpha$.

Der zweite im folgenden mit i_r oder $\boldsymbol{i}_r$ bezeichnete Teil von i oder $\boldsymbol{i}$ möge das exogene Teilindukt heißen, weil sein Wert mit von den beiden Reizen r und $\boldsymbol{r}$ abhängig ist. Bei unveränderten Wertigkeiten der beiden Elemente, aber geänderten Reizwerten ist also nur das exogene Teilindukt geändert. Für dasselbe gilt die Gleichung

$$\left.\begin{aligned} i_r &= \frac{k}{1 - 4\,k^2} \, (\boldsymbol{\delta}\boldsymbol{r} - 2\,k\,\delta r) \\ \boldsymbol{i}_r &= \frac{k}{1 - 4\,k^2} \, (\delta r - 2\,k\,\boldsymbol{\delta}\boldsymbol{r}) \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

Im Hinblick auf die weiteren Erörterungen sei noch hervorgehoben, dass sich aus der letzteren Gleichung u. a. folgende Sätze ergeben:

I. Je größer der eigene D-Reiz des einen Elementes im Vergleiche mit dem D-Reize des anderen ist, desto kleiner ist sein eigenes exogenes Indukt und desto größer das exogene Indukt im anderen Elemente.

II. Ein positiver (bezw. negativer) Zuwuchs zum D-Reize des einen Elementes bedingt in diesem einen proportionalen negativen (bezw. positiven) Zuwuchs zu seinem exogenen Indukt und einen positiven (bezw. negativen) Zuwuchs zum exogenen Indukte des anderen Elementes.

III. Wenn beide D-Reize im gleichen Verhältnisse vergrößert oder verkleinert sind, so ist auch das exogene Indukt in beiden Elementen in demselben Verhältnis vergrößert oder verkleinert.

IV. Wenn die beiden Reize gleiche Größe r haben, so verwandelt sich die Gleichung (5) in

$$i_r = \left(\frac{k}{1 - 4\,k^2}\right) r\,(\boldsymbol{\delta} - 2\,k\,\delta)$$

$$\boldsymbol{i}_r = \left(\frac{k}{1 - 4\,k^2}\right) r\,(\delta - 2\,k\,\boldsymbol{\delta})$$

In jedem der beiden Elemente ist dann das exogene Indukt proportional zum gemeinsamen Reize r.

V. Wenn die Wertigkeit der beiden Elemente gleich ist, so verwandelt sich Gleichung (5) in

$$i_r = \left(\frac{k}{1 - 4\,k^2}\right) \delta\,(\boldsymbol{r} - 2\,k\,r)$$

$$\boldsymbol{i}_r = \left(\frac{k}{1 - 4\,k^2}\right) \delta\,(r - 2\,k\,\boldsymbol{r})$$

Dann ist in beiden Elementen das Indukt proportional zur Wertigkeit δ.

VI. Ist nicht nur die Wertigkeit, sondern auch der D-Reiz in beiden Elementen gleichgroß, so ergiebt sich

$$i_r = \boldsymbol{i}_r = \left(\frac{k}{1 + 2\,k}\right) \delta\,r$$

Das exogene Indukt ist dann in beiden Elementen das gleiche und proportional zu ihrer Wertigkeit und ihrem *D*-Reiz.

Der infolge einer Änderung der Netzhautbeleuchtung unter Mitwirkung der Induktion eintretende neue Zustand der Sehsubstanz bedarf einer gewissen, wenn auch kurzen Zeit zu seiner Herstellung. Steigt oder sinkt der *D*-Reiz eines Elementes und damit zugleich der, die Stärke der Induktion bestimmende Unterschiedswert $D - A$ sehr schnell, so kann sich, wie später zu erörtern sein wird, das durch die Gleichung ausgedrückte Indukt in merklicher Weise oszillatorisch entwickeln. Immer vergeht eine gewisse kleine Zeit, bis die Sehsubstanz auf den, der geänderten Netzhautbelichtung entsprechenden neuen Zustand eingestellt ist[1]). Freilich ist auch diese Einstellung eine nur vorübergehende. Denn jedes Überwiegen der Dissimilation über die Assimilation ist mit einer Abnahme, jedes Überwiegen der Assimilation mit einer Zunahme der Wertigkeit verbunden. Der unter Mitwirkung der Induktion entstandene neue Zustand ist daher auch bei unveränderter Fortdauer der neuen Belichtung kein beständiger.

§ 39. **Die Induktion zwischen einem Element und dem Gesamtfelde der Sehsubstanz.** Der im letzten Paragraphen angenommene Fall einer gegenseitigen Induktion zwischen zwei Elementen, die unabhängig von allen übrigen lediglich unter sich in Wechselwirkung ständen, kann zwar in Wirklichkeit nicht vorkommen[2]), giebt aber eine Grundlage für die Untersuchung der Induktion zwischen einem Elemente einerseits und dem es umgebenden Gesamtfelde andererseits, welche Untersuchung uns die Erklärung der im III. und V. Abschnitte beschriebenen Tatsachen ermöglichen soll.

Die folgenden Erörterungen behalten ihre Gültigkeit auch dann, wenn die von einem Elemente ausgehende Wirkung sich nicht bis an die äußerste Grenze des Gesamtfeldes erstreckte, und also jedem Elemente nur ein mehr oder weniger begrenzter Wirkungskreis zukäme.

Ein Element *e* steht gleichzeitig mit allen übrigen in ähnlicher Wechselwirkung, wie mit dem im vorigen Paragraphen allein in Betracht gezogenen

---

1) Schon bei Besprechung der Erscheinungen des reinen Simultankontrastes habe ich betont, dass man z. B. die Deckblätter von den auf Tafel II dargestellten Kontrastbildern nicht allzuschnell wegziehen soll.

2) Selbst wenn keinerlei Abirrung des Lichtes (vgl. § 33) bestände und es dementsprechend möglich wäre, dass nur zwei Elemente der Empfangsfläche Licht empfingen und nur zwei Elemente der Sehsubstanz gereizt würden, und wenn zugleich alle übrigen Elemente mittelwertig wären, und daher von vornherein in ihnen weder *D*- noch *A*-Überschüsse beständen, würden doch die beiden allein gereizten Elemente den Stoffwechsel ihrer Umgebung durch Induktion ändern und diese Änderungen wieder auf sie selbst zurückwirken müssen. Demnach wäre der im vorigen Paragraphen gesetzte Fall auch dann nicht verwirklicht.

Elemente e, jedoch mit dem Unterschiede, dass seinen mannigfach verschiedenen funktionellen Abständen von den übrigen Elementen ebenso mannigfach verschiedene Induktionskoeffizienten (k) entsprechen, und dass jedes der übrigen Elemente, ebenso wie das Element e selbst, wieder von sämtlichen Elementen der Sehsubstanz durch Induktion beeinflusst wird. Es erteilt und empfängt jedes Element soviele Einzelindukte, als Elemente außer ihm vorhanden sind, und aus der algebraischen Summation aller dieser Einzelindukte entsteht in jedem Element das Gesamtindukt J, dessen Größe in den einzelnen Elementen gleichzeitig verschieden sein kann. Letzteres folgt unter gewöhnlichen Umständen schon aus der Verschiedenheit der D-Reize, welche gleichzeitig auf die verschiedenen Elemente wirken, anderenteils ist es durch die Verschiedenheit ihrer jeweiligen Wertigkeit bedingt. Ganz besonders die Reize und Wertigkeiten der Nachbarn eines Elementes werden für die Größe seines Gesamtinduktes maßgebend sein.

Somit tritt jetzt an die Stelle des minimalen Induktes i, das dem Elemente e zukam, als wir es lediglich mit dem Elemente e in Wechselwirkung und von allen übrigen unabhängig dachten, das Gesamtindukt J, und für die Dissimilation und Assimilation jedes Elementes gelten nunmehr nach Analogie der Gleichung (2) in § 38 die Gleichungen

$$D = \delta + \delta r - J \text{ und } A = \alpha + J$$

Aus diesen Gleichungen würden sich dann auch für die korrelative Stelle des psychischen Sehfeldes die Gleichungen für die daselbst erscheinende Farbe sowie für die Helligkeit und das Gewicht der Farbe ableiten lassen. Denn wie früher (S. 34[1]) und 103) dargelegt wurde, lässt sich durch das Verhältnis zwischen der in einem Element der Sehsubstanz eben stattfindenden Dissimilation und Assimilation ($D : A$) die Qualität ($W : S$) der korrelativen tonfreien Farbe eindeutig bezeichnen, desgleichen durch $\frac{D}{D+A}$ die Weißlichkeit oder Helligkeit $\left(\frac{W}{W+S}\right)$ und durch $D + A$ das Gewicht ($W + S$) der Farbe.

Ebenso wie wir uns im vorigen Paragraphen das im Elemente e durch die Induktion seitens des Elementes e bedingte Einzelindukt i in einen endogenen Teil i_0 und einen exogenen i_r zerlegt dachten, lässt sich auch das summarische Gesamtindukt J als aus J_0 und J_r bestehend ansehen. J_0 ist das endogene Gesamtindukt, d. h. die algebraische Summe der sämtlichen minimalen endogenen Einzelindukte, welche das Element von allen anderen Elementen empfängt, und analogerweise ist J_r das exogene Gesamtindukt, d. h. die algebraische Summe aller für das Element geltenden exogenen Einzelindukte. Während J_0 lediglich von den im allgemeinen

1) Auf S. 34 Z. 3 u. 5 von unten ist statt des F ein H zu setzen.

verschiedenen Wertigkeiten der anderen Elemente abhängt, ist J_r zugleich von sämtlichen im fraglichen Zeitpunkt auf diese Elemente wirkenden D-Reizen abhängig.

Da also $J = J_0 + J_r$, so ist

$$D = \delta + \delta r - J_0 - J_r, \text{ und } A = \alpha + J_0 + J_r.$$

Hiernach ist auch die Dissimilation und Assimilation in je einen endogenen Teil D_0 bezw. A_0 und einen exogenen Teil D_r bezw. A_r zerlegbar, und zwar ist

$$D_0 = \delta - J_0 \qquad A_0 = \alpha + J_0$$
und
$$D_r = \delta_r - J_r \qquad A_r = J_r.$$

Die jeweilige Größe der Dissimilation und Assimilation aber ergiebt sich aus

$$D = D_0 + \delta_r - J_r \quad \text{und} \quad A = A_0 + J_r.$$

Wäre also für ein beliebiges Element der Sehsubstanz die Wertigkeit, der es treffende D-Reiz und das ihm zukommende endogene und exogene Gesamtindukt gegeben, so wäre hieraus für die bezügliche Stelle des psychischen Sehfeldes die Farbe F, deren Helligkeit H und Gewicht G aus folgenden Gleichungen ableitbar:

$$F \text{ oder } W : S = (D_0 + \delta r - J_r) : (A_0 + J_r$$

$$H \text{ oder } \frac{W}{W + S} = \frac{D_0 + \delta r - J_r}{\delta + \alpha + \delta r}$$

oder wenn wir wieder $\delta + \alpha = 2$ setzen (vgl. S. 105)

$$H = \frac{D_0 + \delta r - J_r}{2 + \delta r} \qquad (6)$$

$$G = 2 + \delta r.$$

Das Gewicht der tonfreien Farbe einer Sehfeldstelle ist also unabhängig von den in der Sehsubstanz eben bestehenden Induktionen und eine lineare Funktion des Produktes aus der Wertigkeit und dem D-Reize des bezüglichen Elementes der Sehsubstanz.

§ 40. Der Einfluss der Induktion auf die Eigenhelligkeit des Sehorganes. Nach der hier entwickelten Theorie der Induktion wirkt nicht die Bestrahlung des Sehepithels als solche induzierend, sondern der Stoffwechsel der Sehsubstanz, der zwar unter Vermittlung des Sehepithels durch das Licht verändert wird, aber auch bei Ausschluss jedes äußeren Reizes fortwährt. Verhielte es sich anders, so könnte im unbelichteten Sehorgane keine Induktion stattfinden. Dass aber auch da Induktionen erfolgen, solange die Sehsubstanz noch nicht allenthalben in den Zustand der Mittelwertigkeit zurückgekehrt ist, lehren uns die später zu besprechenden Nachwirkungen der Bestrahlung im verfinsterten Auge.

Zu diesen gehört auch folgende Erscheinung: Wenn wir einige Zeit hindurch den Augen eine weitausgedehnte Fläche von überall möglichst gleicher Lichtstärke, z. B. eine weiße, nicht von der Sonne beschienene Zimmerwand dargeboten oder im hellen Zimmer sitzend vor jedem Auge ein gut angepasstes halbkugelig geformtes Mattglas oder Milchglas getragen haben, und nachher die Augen lichtdicht bedecken, so sind zunächst alle Teile der Sehsubstanz im Zustande mehr oder minder großer Unterwertigkeit und es besteht überall ein entsprechender A-Überschuß. Gäbe es jetzt keine Induktion, so wäre in allen Elementen der Sehsubstanz die Dissimilation und die Assimilation lediglich eine autonome, die Eigenfarbe jeder Stelle des Sehfeldes wäre nur durch das Verhältnis $\delta : \alpha$, und die Helligkeit dieser Farbe durch $\frac{\delta}{\delta + \alpha} = \frac{\delta}{2}$ bestimmt. Infolge der Induktion seitens seiner Umgebung aber erhält das Element das endogene Gesamtindukt J_0, welches, da überall ein A-Überschuss besteht, ein Hellindukt ist. In jedem Elemente ist daher $D = \delta + J_0$, $A = \alpha - J_0$, und die der korrelativen Stelle des psychischen Sehfeldes eigene Helligkeit $H = \frac{\delta + J_0}{2}$ oder $\frac{D_0}{2}$, also, da J_0 ein Hellindukt ist, größer, als sie ohne die Induktion sein würde.

In der That sehen wir unter den eben erwähnten Umständen nach der Verfinsterung der Augen keineswegs ein tiefes Schwarz, wie dies nach der üblichen Ermüdungslehre zu erwarten wäre, sondern die Eigenfarbe unseres Auges ist jetzt nur mehr oder weniger schwärzlich-grau und wird weiterhin nicht etwa dunkler, sondern noch heller.

Hat man die Augen vor ihrer Verfinsterung ungewöhnlich stark belichtet, z. B. die Himmelsfläche oder eine besonnte Mauer- oder Schneefläche betrachtet, so sind die Bedingungen des gewöhnlichen Sehens mit helladaptiertem Auge überschritten, und es können später zu besprechende außergewöhnliche Erscheinungen auftreten.

Nach der üblichen Ansicht wäre das offene Auge tagsüber in einem Ermüdungszustande, der einen um so höheren Grad hat, je stärker die Beleuchtung der uns umgebenden Dinge ist. Der stetige »innere Lichtreiz«, welcher auch bei gänzlicher Verfinsterung unverändert fortbestehen soll, müsste dann wegen der sehr herabgesetzten »Erregbarkeit« der Netzhaut eine so schwache »Erregung« derselben bewirken, dass die Eigenfarbe jenem absoluten Schwarz sehr nahe kommen müsste, welches nach dieser Lehre dem Fehlen jeder »Erregung« entsprechen würde. Dies ist, wie gesagt, nicht der Fall.

Durch die beschriebene wechselseitige Hellinduktion im reizfreien unterwertigen Sehsubstanzfelde wird die aufsteigende Änderung der Sehsubstanz

verlangsamt und letztere erreicht die Mittelwertigkeit später, als wie dies ohne Induktion der Fall sein würde. In dem Maße aber, als die anfängliche Unterwertigkeit sich wieder vermindert, wird auch die Eigenhelligkeit wieder größer und nähert sich der Helligkeit des mittlen Grau, durch welches die Mittelwertigkeit charakterisiert ist.

§ 41. Die Beziehungen zwischen den Helligkeiten der Sehdinge und der Gesamtbeleuchtung der sichtbaren Außendinge. Es ist anzunehmen, dass das Licht nur deshalb ein Reiz für die Sehsubstanz ist, weil es im Sehepithel teilweise absorbiert wird, und dass daher nur ein in andere Energieart umgesetzter Teil der Strahlungsenergie als D-Reiz r in Rechnung kommt. Die Menge der absorbierten Energie ist von der jeweiligen Beschaffenheit und Menge des absorbierenden Empfangstoffes abhängig und zur Energie der auffallenden Strahlung proportional. Hiernach lässt sich mit Wahrscheinlichkeit auch der D-Reiz zur Lichtstärke der bezüglichen Netzhautbildstelle proportional setzen, welche Lichtstärke bei gleicher Pupillenweite wieder zur Lichtstärke des auf der Netzhautstelle abgebildeten Außendinges proportional ist.

Infolge dieser durchgängigen Proportionalität giebt uns die in § 39 entwickelte Gleichung

$$H = \frac{D_0 + \delta r - J_r}{2 + \delta r}$$

Aufschluss über die Art der Abhängigkeit der Helligkeiten im psychischen Sehfeld sowohl von den Lichtstärken im Netzhautbilde, als zugleich auch von den Lichtstärken der abgebildeten Außendinge, oder wie man zu sagen pflegt, über den Zusammenhang zwischen »objektiver« und »subjektiver« Helligkeit.

Man denke sich ein bei wiederholter Betrachtung in allen räumlichen Beziehungen unverändertes Gesichtsfeld, das nur aus nicht selbstleuchtenden Dingen von gleichbleibendem Remissionsvermögen (vgl. § 16) besteht, dazu eine unverändert bleibende Lage des Auges und eine Gesamtbeleuchtung, die nur in ihrer Stärke, nicht aber in der Art ihrer Verteilung über das Gesichtsfeld veränderlich ist, so dass die Lichtstärken aller Teile desselben stets in gleichem Verhältnis zu- oder abnehmen, wenn die Gesamtbeleuchtung zu- oder abnimmt. Ein solches Gesichtsfeld, in dem also auch die Verhältnisse zwischen den Lichtstärken seiner Einzelteile bei wiederholter Betrachtung immer wieder dieselben wären, möge als ein stabiles bezeichnet werden. Auch das Gesamtnetzhautbild eines solchen Gesichtsfeldes ist insofern ein stabiles, als die Verhältnisse zwischen den Lichtstärken seiner Einzelteile sowohl von der Stärke der Gesamtbeleuchtung des Gesichtsfeldes, als auch von der jeweiligen Pupillenweite, kurz gesagt, von der Stärke der Gesamtbeleuchtung der Netzhaut unabhängig und also stabil sind.

Insoweit der D-Reiz, den eine Strahlung unter Vermittlung der Empfangschichte der Netzhaut auf die Sehsubstanz ausübt, bei gleichbleibender Empfänglichkeit zur Energie der Strahlung proportional ist, entspricht der Stabilität der Lichtstärkenverhältnisse im Netzhautbilde auch eine Stabilität der Reizstärkenverhältnisse. Dabei können wegen Verschiedenheit der Empfänglichkeit der einzelnen Netzhautstellen die Verhältnisse der D-Reizstärken andere sein als die Verhältnisse der Lichtstärken; es kommt hier nur darauf an, dass erstere bei jeder Stärke der Gesamtbeleuchtung dieselben bleiben.

In § 38 (S. 166, III) wurde für zwei Elemente e und $\boldsymbol{e}$ der Sehsubstanz, die betreffs der Induktion lediglich voneinander abhängig wären, dargelegt, dass, wenn bei unveränderten Wertigkeiten (δ und $\boldsymbol{\delta}$) der beiden Elemente die Stärken ihrer beiden D-Reize (r und $\boldsymbol{r}$) im gleichen Verhältnisse geändert wären, das exogene Indukt jedes Elementes in demselben Verhältnis vergrößert oder verkleinert wäre, in welchem die beiden Reize vergrößert oder verkleinert sind. Das Analoge muss nun auch für das in § 39 besprochene exogene Gesamtindukt J_r jedes Elementes gelten, weil J_r die algebraische Summe sämtlicher exogenen Einzelindukte des Elementes ist. Es wird also, wenn die D-Reize sämtlicher Elemente der Sehsubstanz in gleichem Verhältnisse geändert sind, in demselben Sinne und Verhältnisse auch das exogene Gesamtindukt jedes Elementes geändert sein. Mit anderen Worten: Die Größe des exogenen Gesamtinduktes (J_r) eines Elementes ist bei stabilem Gesichtsfelde proportional zur Gesamtbeleuchtung der Netzhaut, wenn zugleich auch das somatische Sehfeld ein stabiles ist, d. h. die Empfänglichkeiten aller Einzelteile der Empfangschichte und die Wertigkeiten aller Teile des Sehsubstanzfeldes unverändert sind.

Unter solchen Umständen haben also die Werte von r und J_r als proportional zur Stärke der Gesamtbeleuchtung der Netzhaut zu gelten, und ist deshalb das Verhältnis zwischen r und J_r ein unveränderliches. Bezeichnen wir durch n den Koeffizienten, mit welchem wir den Wert von δr versehen müssen, um den Wert von J_r auszudrücken, so ist $J_r = n\delta r$ und $\delta r - J_r = \delta r\ (1-n)$, wobei zu bemerken ist, dass der Wert von n nie auf o herabsinken könnte, weil dies das Fehlen jeder Induktion bedeuten würde und nie bis auf 1 ansteigen könnte, weil damit gesagt wäre, dass die Dissimilation trotz gegebenem D-Reiz r keinen Zuwachs erfahre.

Die in § 39 S. 168 entwickelten Gleichungen für die Assimilation und Dissimilation, die Farbe F und ihre Helligkeit H verwandeln sich nunmehr in die Gleichungen

$$D = D_0 + \delta r\,(1-n);\quad A = A_0 + n\delta r$$

$$F = [D_0 + \delta r\,(1-n)] : [A_0 + n\delta r]$$

$$H = \frac{D_0 + \delta r\,(1-n)}{2 + \delta r} \qquad (7)$$

Aus der letzten Gleichung ist ersichtlich, dass in dem besonderen Falle, wo $\frac{D_0}{2} = 1 - n$ ist, die Helligkeit unter den genannten Umständen ganz unabhängig von r und also auch von der Gesamtbeleuchtung der Netzhaut wird und, da $D_0 = \delta - J_0$ ist, nur noch durch die Wertigkeit des fraglichen Elementes und das von den gleichzeitigen Wertigkeiten aller übrigen Sehfeldelemente abhängige endogene Gesamtindukt J_0 bestimmt wird.

Diese durch $\frac{D_0}{2}$ ausgedrückte Helligkeit ist also dieselbe, welche an der fraglichen Stelle auch dann gesehen würde, wenn die Netzhaut ganz unbelichtet wäre, d. h. sie ist die eben bestehende Eigenhelligkeit des fraglichen Elementes der Sehsubstanz, sofern außer dem Lichte auch jeder zufällige, nichtoptische Reiz ausgeschlossen ist. Während aber bei unbelichteter Netzhaut das Gewicht der jeweiligen Eigenfarbe nur $= \delta + \alpha$, d. h. $= 2$ wäre, ist das Gewicht der nach Qualität und Helligkeit gleichen Farbe, welche uns im besprochenen Falle bei offenem Auge an der bezüglichen Stelle des Gesichtsfeldes erscheint $= 2 + \delta r$.

In jedem stabilen Gesichtsfelde kann es also, gleichbleibende Empfänglichkeiten und Wertigkeiten im somatischen Sehfelde vorausgesetzt, eine oder auch mehr Stellen geben, deren Helligkeit von der jeweiligen Stärke der Gesamtbeleuchtung des Gesichtsfeldes und der Netzhaut unabhängig ist, und die uns deshalb bei jeder beliebigen schwachen oder starken Gesamtbeleuchtung in derselben Helligkeit erscheinen, sofern die Stärke der Beleuchtung nicht etwa das Leistungsvermögen unseres Sehorganes überschreitet.

Aus der Gleichung

$$H = \frac{D_0 + \delta r (1 - n)}{2 + \delta r}$$

ergibt sich ferner, dass, wenn $1 - n$ kleiner als $\frac{D_0}{2}$ ist, die Helligkeit der tonfreien Farbe, in der wir die bezügliche Stelle des stabilen Gesichtsfeldes sehen, umso kleiner und also ihre Dunkelheit umso größer ist, je stärker die Gesamtbeleuchtung der Netzhaut ist, und dass nur dann, wenn $1 - n$ größer als $\frac{D_0}{2}$ ist, mit der größeren Stärke dieser Gesamtbeleuchtung auch eine größere Helligkeit H einhergeht.

Ob also bei gegebenen Wertigkeiten sämtlicher Elemente der Sehsubstanz und gegebenen Empfänglichkeiten sämtlicher Elemente des Empfangsfeldes die Helligkeit eines Außendinges bei stärkerer Gesamtbeleuchtung des Gesichtsfeldes größer oder kleiner als bei schwächerer, oder im

besonderen Falle bei allen Beleuchtungsstärken dieselbe ist, hängt unter normalen Umständen lediglich von der jeweiligen Verteilung der Lichtstärken im übrigen Gesichtsfelde ab.

Diese Folgerungen aus dem Induktionsgesetze stehen, wie noch im einzelnen zu erörtern sein wird, mit den in § 17 S. 70—72 beschriebenen Tatsachen in Einklang, dagegen in schroffem Widerspruche zu der landläufigen Behauptung, dass die Helligkeit aller eben sichtbaren Außendinge, gleiche »Erregbarkeit« des Auges vorausgesetzt, mit der Stärke der Beleuchtung stets zunehme, sei es nach dem Fechner'schen Gesetze oder nach einer anderen Regel. Wollte man bei dieser Behauptung unter Helligkeit die Lichtstärke der Außendinge verstehen, so würde man nur etwas Selbstverständliches aussagen; will man aber als Helligkeit eine Beschaffenheit der »Empfindung« bezeichnen, welche uns das von einem Außendinge zur Netzhaut gelangte Licht erweckt, so behauptet man für die weit überwiegende Mehrzahl der Fälle von einem großen Teil der eben sichtbaren Außendinge das Gegenteil von dem, was wahr und wirklich ist; denn eine stärkere Gesamtbeleuchtung des Gesichtsfeldes und der Netzhaut kann nicht bloß eine gesteigerte, sondern auch eine geminderte Helligkeit eines Außendinges bedingen.

§ 42. Graphische Darstellung der Beziehungen zwischen der Helligkeit der Sehdinge und der Stärke der Gesamtbeleuchtung der Außendinge. Wie im vorigen Paragraphen dargelegt wurde, drückt die Gleichung

$$H = \frac{D_0 + \delta r (1 - n)}{2 + \delta r} \qquad (7)$$

das Gesetz aus, nach welchem bei gegebenem Zustande des Sehorganes und gegebenem Gesichtsfelde die Helligkeit eines Sehdinges von der Stärke der Gesamtbeleuchtung der Netzhaut abhängt. Dies möge nun durch einige Kurven anschaulich gemacht werden.

Wir denken uns also ein stabiles Gesichtsfeld und ein stabiles somatisches Sehfeld, wie es im vorigen Paragraphen definiert wurde; damit sind zugleich die Werte von δ, D_0 und n gegeben. Als einzige Variable bleibt die zur jeweiligen Gesamtbeleuchtung der Netzhaut proportionale Größe von r übrig, welche auf der Abszissenachse eines rechtwinkeligen Koordinatensystems abgetragen wird. Die Helligkeitswerte sind auf der Ordinatenachse abzutragen, auf welcher der Nullpunkt S dem absoluten Schwarz und also der Helligkeit 0, der Punkt W dem absoluten Weiß und also der maximalen Helligkeit 1 entspricht, wie dies schon in § 21 S. 97 erörtert wurde. Wie groß wir die dem Einheitswerte von r entsprechende Abszisse nehmen, ist ebenso willkürlich wie die Länge, welche wir der tonfreien Farbenlinie SW auf der Ordinatenachse geben.

Ist die Beleuchtungsstärke des Gesichtsfeldes und also auch r gleich Null, so verwandelt sich unsere Gleichung in

$$H = \frac{D_0}{2}.$$

Dies bedeutet, dass die Helligkeit der dem bezüglichen Elemente e der Sehsubstanz entsprechenden Stelle des psychischen Sehfeldes nur noch von der eben bestehenden Wertigkeit des Elementes e einerseits und von den Wertigkeiten sämtlicher Elemente seiner Gesamtumgebung andererseits abhängig ist (vgl. § 40). Der dieser Helligkeit entsprechende Punkt der tonfreien Farbenlinie SW ist der Anfangspunkt der zu bestimmenden Kurve.

Um mit dem einfachsten Falle zu beginnen, sei angenommen, dass sämtliche Elemente der Sehsubstanz sich im Zustande der Mittelwertigkeit befinden und daß also überall $\delta = 1$ und $\delta - \alpha = 0$ sei. Wenn solchenfalls das Gesichtsfeld ganz unbeleuchtet wäre, so wäre auch $D - A = 0$, denn es gäbe nirgends in der Sehsubstanz einen D- oder A-Überschuß und folglich auch keinerlei Induktion. Dann wäre für das Element e

$$D_0 = \delta = 1, \text{ und } \frac{D_0}{2} = 0{,}5.$$

Ist jedoch das Gesichtsfeld beleuchtet, wobei seine einzelnen Teile beliebig verschiedene Lichtstärke haben können, so ist auch der für das Element e geltende Wert der Konstanten n in die Gleichung (7) einzusetzen. Derselbe ist von der Verteilung der Lichtstärken auf der Netzhaut abhängig und in Gemäßheit der Theorie stets ein echter Bruch. Jedem möglichen Wert von n entspricht dann eine besondere Kurve, und alle diese Kurven gehen von demselben Punkte (0,5) der Ordinatenachse aus. So ergiebt sich eine ganze Schar von Helligkeitskurven, deren jede ein Stück einer gleichseitigen Hyperbel ist.

In Figur 34 sind aus dieser Schar nur die Kurven dargestellt, welche den am rechtseitigen Rande der Figur angemerkten fünf n-Werten 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8 und überdies der rein theoretischen Vollständigkeit wegen auch noch die Kurven für die beiden Grenzfälle, wo $n = 1$, oder $= 0$ wäre, was in Wirklichkeit ausgeschlossen ist.

Die oberste Kurve der Figur würde für den Fall gelten, wo $n = 0$ wäre, und also keinerlei exogenes Indukt bestände; sie wurde bereits in § 21 Fig. 16 abgebildet.

Um in die ungewohnte Methode einzuführen, nach welcher die Beziehungen zwischen Lichtstärke und Helligkeit zu behandeln sind, wenn man die verschiedenen tonfreien Helligkeiten nicht als Intensitätsstufen einer qualitativ gleichen Empfindung, sondern als qualitativ verschiedene Empfindungen gelten lässt, habe ich nämlich bereits in § 21 S. 95—99 eine graphische Darstellung solcher Beziehungen gegeben. Es geschah dies noch ohne jede Rücksicht auf die erst

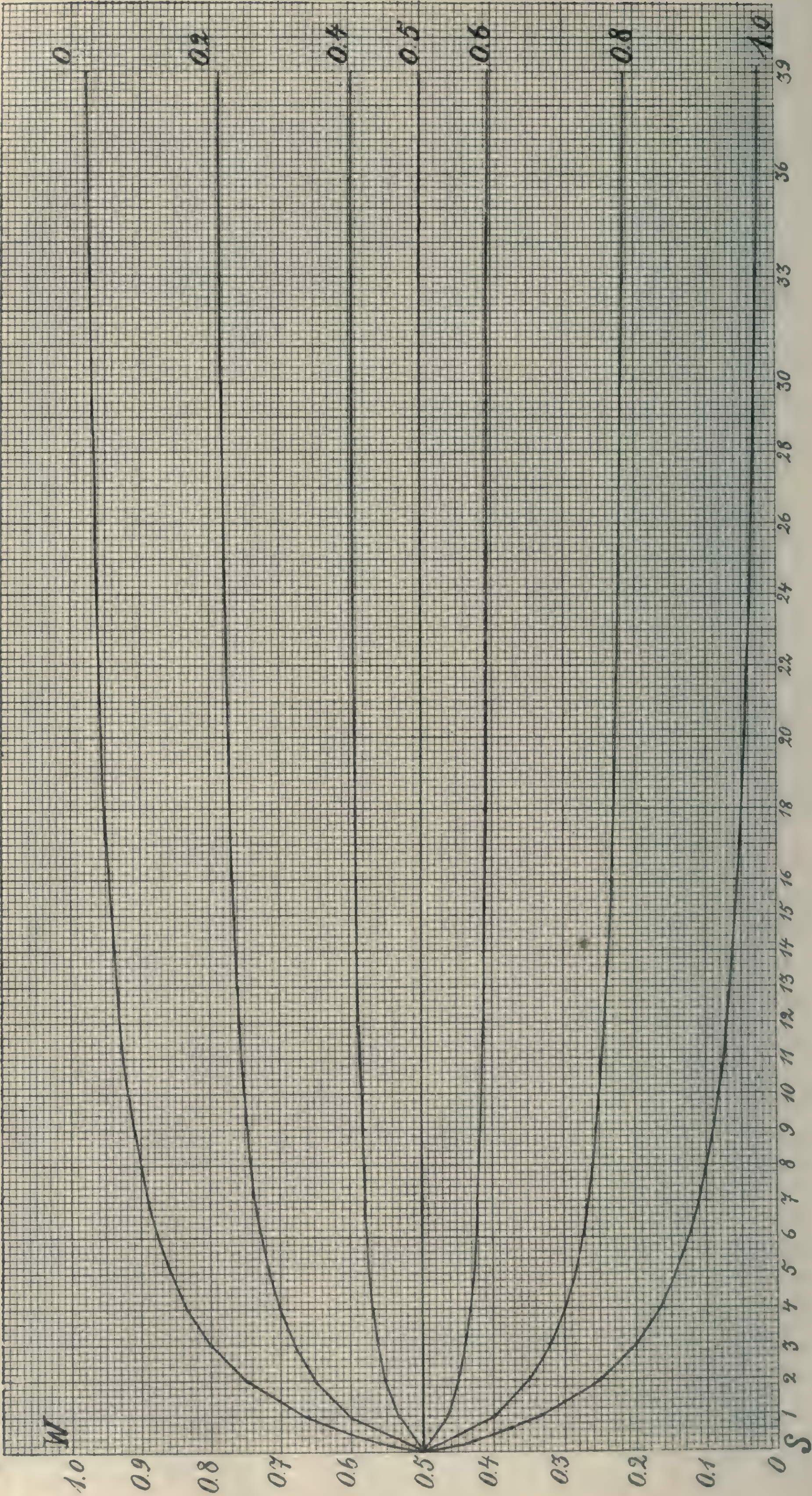

W
S
0
0.2
0.4
0.5
0.6
0.8
1.0
1.0 0.9 0.8 0.7 0.6 0.5 0.4 0.3 0.2 0.1 0
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 18 20 22 24 26 28 30 33 36 39

Fig. 34.

im IV. Abschnitte dargelegte Hypothese über die somatischen Korrelate der tonfreien Farben und unter vorläufiger Weglassung der durch die Wechselwirkung der Sehfeldstellen bedingten Verwickelungen, mit dem Hinweise auf die spätere Erörterung derselben. Es wurde angenommen, daß durch die Belichtung lediglich die weiße Komponente der jeweiligen Eigenfarbe des unbelichteten Auges einen der Intensität der Belichtung proportionalen Zuwuchs erhalte, die schwarze Komponente der Eigenfarbe aber unbeeinflusst bleibe. Nunmehr haben wir an die Stelle der weißen Komponente der letzteren die entsprechende Größe von δ, an Stelle der schwarzen die Größe von α gesetzt und den durch die Belichtung bedingten Zuwuchs mit δr bezeichnet. Gäbe es keine Wechselwirkung, so würden wir, nur mit veränderten Größen, für H dieselben Gleichungen erhalten, wie die in § 21 aufgestellten.

Die unterste Kurve unserer Figur 34 veranschaulicht den anderen, in Wirklichkeit ebenfalls ausgeschlossenen Grenzfall, bei welchem $n = 1$ und daher $r(1 - n) = 0$, also der durch den D-Reiz r bedingte Zuwuchs zur Dissimilation des Elementes e durch das exogene Dunkelindukt seitens des übrigen Sehfeldes ganz aufgehoben wäre.

Die Zwischenräume zwischen je zwei Kurven der Fig. 34 hat man sich durch alle die Kurven erfüllt zu denken, für welche der Wert von n zwischen den zu den beiden Kurven gehörigen Werten liegen würde. Jede Kurve verläuft um so flacher, je mehr sich der zugehörige Wert von n demjenigen nähert, bei welchem $1 - n = \frac{D_0}{2}$ ist, und an die Stelle der Kurve eine Gerade tritt. Durch diese Gerade, welche die Linie der unveränderlichen Helligkeit heißen möge, ist ausgedrückt, dass bei diesem Werte von n und irgendwelcher, wenn auch noch so starken, jedoch nicht schädigenden Beleuchtung des gegebenen Gesichtsfeldes, die tonfreie Farbe der bezüglichen Sehfeldstelle immer dieselbe Qualität und also auch Helligkeit hat. Nur in einer Beziehung ist diese Farbe nicht auf der ganzen Linie, d. h. bei allen Beleuchtungsstärken des Gesichtsfeldes dieselbe, nämlich inbetreff ihres Gewichtes; denn dieses wächst mit der Stärke der Gesamtbeleuchtung der Netzhaut und ist eine lineare Funktion derselben. n unserer G leichung ist das jeweilige Gewicht der Farbe durch den Nenner $2 + \delta r$ ausgedrückt (vgl. § 39 S. 169).

Die ganze Kurvenschar der Fig. 34 ist durch die Linie der unveränderlichen Helligkeit in zwei Kurvengruppen geteilt, eine obere, dem Gebiete der übermittlen Helligkeiten, und eine untere, dem Gebiete der untermittlen Helligkeiten angehörige Gruppe. Man sieht, dass es ganz von dem Werte n abhängt, ob mit der Stärke der Gesamtbeleuchtung die Helligkeit des Elementes, für welches die Kurven unserer Figur gelten, wächst oder abnimmt oder ganz unverändert bleibt. In jeder Kurve der oberen Gruppe wächst, abgesehen von letzterem Falle, mit der Stärke der Gesamtbeleuchtung die der jeweiligen Ordinate entsprechende Helligkeit anfangs am meisten,

weiterhin immer weniger, und die Kurve nähert sich dabei immer mehr einer zur Abszissenachse parallelen Geraden, welche die Asymptote der Kurve und am rechtseitigen Rande der Figur durch den Wert der zur Kurve gehörigen Konstanten n bezeichnet ist. Auf der schwarzweißen Farbenlinie SW entspricht jeder solchen Asymptote die durch $1 - n$ ausdrückbare Helligkeit.

Analoges gilt für jede Kurve der unteren Gruppe, jedoch mit dem Unterschiede, dass hier mit steigender Stärke der Gesamtbeleuchtung der Netzhaut die Helligkeit der bezüglichen Sehfeldstelle immer mehr abnimmt, d. h. ihre Farbe sich mehr und mehr verschwärzt, und also ihre Dunkelheit sich ebenfalls einem durch die Asymptote der Kurve bestimmten Maximum nähert.

So macht die Fig. 34 zugleich anschaulich, dass einerseits die Helligkeit, andererseits die Dunkelheit der tonfreien Farbe, welche an der zum Element e gehörigen Stelle des psychischen Sehfeldes gesehen werden kann, eine gesetzmäßig limitierte ist, d. h. dass sie unter normalen Stoffwechselbedingungen nie über eine gewisse, jeder einzelnen Kurve eigentümliche Grenze hinausgehen kann; dass ferner diese Grenze der Helligkeit oder Dunkelheit durch den für die bezügliche Kurve geltenden Wert von n und also durch die exogene Induktion bestimmt ist und für jede Kurve um so tiefer liegt, je größer der zugehörige Wert von n ist.

Fig. 34 lehrt ferner, dass das Bereich der Helligkeiten, bzw. Dunkelheiten, welche unter den angenommenen Voraussetzungen einem Sehfeldelement zukommen können, um so kleiner ist, je weniger der Wert der für das Element geltenden Konstanten n von demjenigen Werte abweicht, bei welchem die Helligkeit des Elementes ganz unabhängig ist von der Stärke der Gesamtbeleuchtung des gegebenen Gesichtsfeldes, d. h. wo für den hier angenommenen Fall der Mittelwertigkeit des Elementes

$$1 - n = \frac{D_0}{2}$$

ist.

Jede Gerade, welche man sich parallel zur Abszissenachse durch die Kurvenschar gelegt denkt, durchschneidet sämtliche Kurven an Punkten gleicher Helligkeit, aber jeder solche Schnittpunkt entspricht einem anderen Werte von r und also einer anderen Stärke der Gesamtbeleuchtung. Somit lehrt jede solche Linie gleicher Helligkeit (Isophane), dass eine und dieselbe Stelle des gegebenen Gesichtsfeldes, je nach dem für das bezügliche Element der Sehsubstanz eben geltenden Werte von n, bei den verschiedensten Stärken der Gesamtbeleuchtung in derselben Helligkeit erscheinen kann.

Wie jede parallel zur Abszissenachse durch die Kurvenschar gelegte Gerade eine Linie gleicher Helligkeit darstellt, so jede parallel zur Ordi-

natenachse gehende Gerade eine Linie gleicher Reizstärke, denn sie umfasst bei stabilem Gesichtsfelde und stabilem somatischen Sehfeld alle Helligkeiten, welche bei einer und derselben Reizstärke je nach dem gleichzeitigen Werte von n theoretisch möglich sind. Der Umfang dieser bei gleicher Reizstärke möglichen Helligkeiten eines und desselben Außenortes wächst, wie Fig. 34 lehrt, mit der Stärke der allgemeinen Beleuchtung und ist, rein theoretisch, durch die beiden Punkte begrenzt, in denen die Linie gleicher Reizstärke einerseits die oberste, andererseits die unterste Kurve der Kurvenschar durchschneidet. Da jedoch der durch die Größe des exogenen Induktes bestimmte Wert von n nie bis auf 1 steigen oder bis auf 0 sinken kann, so reicht in Wirklichkeit der Bereich der bei gleicher Beleuchtungsstärke möglichen Helligkeiten eines und desselben Außenpunktes weder nach oben noch nach unten bis an die bezügliche theoretische Grenzkurve heran. Hierdurch wird jedoch nichts daran geändert, dass je größer die Beleuchtungsstärke und mit ihr der D-Reiz, desto größer auch der Umfang der bei derselben Beleuchtungsstärke möglichen Helligkeiten des bezüglichen Außenpunktes ist.

Der für Fig. 34 angenommene einfachste Fall der Mittelwertigkeit aller Elemente der Sehsubstanz ist nur verwirklicht, wenn das Auge so lange verfinstert worden ist, bis in der Sehsubstanz, wenn auch nicht zugleich in der Empfangschichte, die Nachwirkungen einer vorausgegangenen Belichtung verschwunden sind, und sich überall das autonome Gleichgewicht zwischen Dissimilation und Assimilation wieder hergestellt hat; immer vorausgesetzt, dass innere, durch Blutlauf und Atmung bedingte Reize nicht mit in Betracht kommen. Bei offenem, im beleuchteten Raume beschäftigten Auge aber herrscht immer eine je nach der Stärke der Beleuchtung größere oder kleinere durchschnittliche Unterwertigkeit in der Sehsubstanz. Dabei kann die Wertigkeit an verschiedenen Stellen des Sehsubstanzfeldes eine sehr verschiedene sein. War z. B. für ein Element der D-Reiz r vorher nur ein minimaler, während er für die Umgebung des Elementes groß war, so kann das letztere infolge des starken exogenen Dunkelinduktes sogar vorübergehend überwertig sein. Im allgemeinen aber besteht beim gewöhnlichen Sehen eine, in den einzelnen Elementen der Sehsubstanz allerdings verschiedene, Unterwertigkeit.

Es sei hier nochmals betont, dass die nervöse Sehsubstanz nicht mit den in der Empfangschichte der Netzhaut enthaltenen Empfangstoffen (den Sehstoffen W. Kühne's) verwechselt werden darf. Die Sehsubstanz könnte z. B. nach der Verfinsterung des Auges schon in den Zustand der Mittelwertigkeit zurückgekehrt und also vollständig an die Finsternis adaptiert sein, während der Gehalt der Empfangschichte an Empfangstoffen und mit ihm die Lichtempfänglichkeit noch weiter wächst. Man darf, wie schon in § 25 (S. 113) gesagt wurde, die Anpassung der Sehsubstanz ebensowenig mit der Anpassung des Empfängers verwechseln, als mit der Anpassung der Pupille.

Unter gewöhnlichen Umständen wird also im Element e, um dessen Helligkeitskurve es sich eben handelt, ein endogenes negatives Gesamtindukt d. i. ein Hellindukt bestehen (vgl. § 40), wenn nicht etwa zufällig die algebraische Summe sämtlicher Einzelindukte seitens seiner Umgebung $= 0$ wäre. Auch das Element e selbst wird nur in seltenen Ausnahmefällen mittelwertig oder überwertig, vielmehr im allgemeinen unterwertig sein. Kurz gesagt, die durch $\frac{D_0}{2}$ ausgedrückte Eigenhelligkeit des Elementes wird beim gewöhnlichen Sehen im allgemeinen nicht $= 0{,}5$ d. i. die Helligkeit des mittlen Grau, sondern kleiner und nur ausnahmsweise größer sein.

Da der Wert von $\frac{D_0}{2}$ d. h. von $\frac{\delta - J_0}{2}$ ebensowohl von der Wertigkeit (δ) des Elementes e als von dem endogenen Gesamtindukte (J_0) abhängt, welches es von seiner Gesamtumgebung erhält, so kann bei gleicher Wertigkeit des Elementes der Wert von $\frac{D_0}{2}$ je nach der Größe dieses endogenen Induktes ein verschiedener sein; ebenso kann bei gleicher Größe des endogenen Induktes der Wert von $\frac{D_0}{2}$ je nach Wertigkeit des Elementes ein verschiedener sein; endlich kann bei demselben Wert von $\frac{D_0}{2}$ zugleich die Wertigkeit des Elementes und die Größe des endogenen Gesamtinduktes variieren. Hier muss ich mich begnügen, nur ein Beispiel für die Fälle zu geben, wo $\frac{D_0}{2}$ kleiner als 0,5 ist.

Ein solcher Fall von Unterwertigkeit des Elementes e und von gleichzeitiger, aus durchschnittlicher Unterwertigkeit des übrigen Sehsubstanzfeldes folgender endogener Hellinduktion ist der Fig. 35 zugrunde gelegt. Es ist für das Element e diejenige Unterwertigkeit angenommen, bei welcher $\delta = 1/3$ wäre. Die Größe des endogenen Gesamtinduktes ist auch ganz willkürlich gleich $1/3$ angenommen. Hieraus ergibt sich nach Gleichung

$$D_0 = \delta - J_0$$

für D_0 der Wert $2/3$ und also für $\frac{D_0}{2}$ der Wert $1/3$; denn J_0 ist hier ein Hellindukt und kommt als negative Größe in Rechnung (vgl. § 38 S. 165). Der Linie unveränderlicher Helligkeit entspricht daher in Fig. 35 die Helligkeit $1/3$.

Die im Vergleich mit Fig. 34 tiefere Lage der Linie unveränderlicher Helligkeit charakterisiert alle Kurvenscharen, die für ein unterwertiges Element gelten, wenn wie gewöhnlich beim Tagsehen seine Umgebung ebenfalls unterwertig ist. Je tiefer diese Linie liegt, desto größer ist das Gebiet

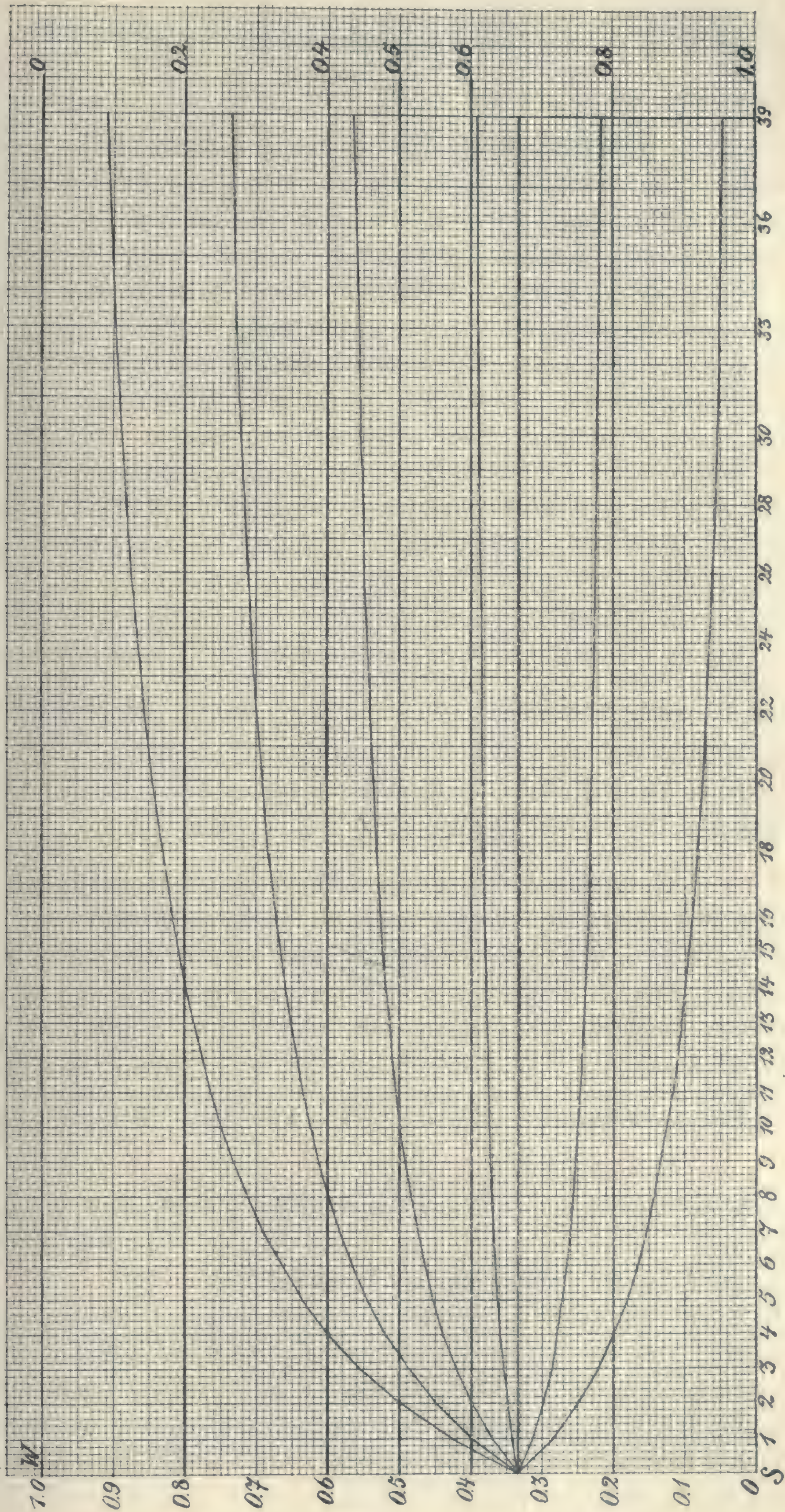

W
S
0
0.2
0.4
0.5
0.6
0.8
1.0
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
18
20
22
24
26
28
30
33
36
39

Fig. 35.

der bei wachsender Allgemeinbeleuchtung ansteigenden, desto kleiner das Gebiet der dabei absinkenden Helligkeitskurven.

In Fällen, wo $\frac{D_0}{2}$ größer als $^1/_2$ wäre, und daher die Linie der unveränderlichen Helligkeit höher läge als in Fig. 34, entspräche diese Helligkeit einer übermittelgrauen Farbe und das Gebiet der ansteigenden Helligkeitskurven wäre dann kleiner als das der absteigenden.

Nach FECHNER und HELMHOLTZ würde es nur eine einzige Helligkeitskurve geben, die man erhält, wenn man für das bezügliche Element des psychophysischen Sehfeldes auf der Abszissenachse die Produkte aus dem Reize r und der »Erregbarkeit« als Abszissen und die zugehörigen »Intensitäten der Empfindung« als Ordinaten nimmt. Diese Kurve wäre nach FECHNER eine logarithmische und hätte keine Asymptote. Dementsprechend müsste die Helligkeit mit der Lichtstärke theoretisch genommen unbegrenzt wachsen und wäre in Wirklichkeit nur dadurch limitiert, dass eine über ein gewisses Maß hinausgehende Lichtintensität eine Störung der normalen Leistungsfähigkeit des Auges mit sich bringen würde.

Dieser einzigen Helligkeitskurve stehen nach der im obigen entwickelten Lehre unzählige Helligkeitskurven gegenüber; zu jedem möglichen Wert von $\frac{D_0}{2}$ gehört je eine Schar von Helligkeitskurven, und jede solche Schar besteht wieder aus so vielen Helligkeitskurven als Werte von n möglich sind. Nichts kann die Verschiedenheit der beiden Theorien des Lichtsinnes eindringlicher veranschaulichen.

§ 43. Die Induktion als ein Hilfsmittel zur Selbststeuerung des Stoffwechsels der Sehsubstanz. Fehlte jede Induktion, so könnte durch Verstärkung des D-Reizes die Helligkeit bis zum überhaupt denkbaren Maximum gesteigert werden, wie dies die oberste Kurve in Fig. 34 u. 35 anschaulich machte; bei vorhandener Induktion aber erscheint dies von vornherein unmöglich. Wir sahen soeben, dass wenn $1 - n$ größer als $\frac{D_0}{2}$ ist, jedem Werte von n ein Maximum der möglichen Helligkeit entspricht, welches um so tiefer liegt, je größer der Wert von n ist. Dieser Wert aber wächst für ein Element der Sehsubstanz bei gleicher Lichtempfänglichkeit des zugeordneten Empfangselementes der Netzhaut mit der Beleuchtungsstärke der Umgebung des letzteren.

Hiernach erscheint es unter normalen Stoffwechselbedingungen der Sehsubstanz von vornherein ausgeschlossen, dass wir mit helladaptiertem Auge eine ausgebreitete lichtstarke Fläche in derselben grossen Helligkeit sehen, in der uns ein kleiner Teil derselben erscheint, wenn wir z. B. durch eine Dunkelröhre, die am anderen Ende ein Diaphragma mit kleiner Öffnung trägt, nach der Fläche blicken.

Wo immer das Auge einer größeren lichtstarken Fläche gegenübersteht, ist die Limitierung der Helligkeit von besonderer Wichtigkeit, denn sie schützt die Sehsubstanz vor Erschöpfung. Indem mit zunehmendem *D*-Reize einerseits die induzierte Verminderung der Dissimilation, andererseits die induzierte Steigerung der Assimilierung ebenfalls wächst, wird die Geschwindigkeit der absteigenden Änderung der Sehsubstanz wie durch eine automatische Bremse verlangsamt und ihr schließlich eine nicht überschreitbare Grenze gesetzt, sofern nur das Assimilierungsmaterial zureichend vorhanden ist, und keine anderweiten Störungen des normalen Stoffwechsels bestehen.

Zusammenfassend könnte man das soeben Gesagte als den Satz von der Limitierung der Helligkeit durch die Dunkelinduktion bezeichnen.

Der auf Dunkelinduktion beruhende Selbstschutz der Sehsubstanz tritt, wie gesagt, schon während der Entwicklung des durch den Reiz bedingten *D*-Zuwuchses in Wirksamkeit und lässt sich deshalb als eine simultane Anpassung des Stoffwechsels der Sehsubstanz an die Stärke der Gesamtbeleuchtung bezeichnen zum Unterschiede von der schon in § 23 als Selbststeuerung des Stoffwechsels beschriebenen sukzessiven Anpassung, welche erst in dem Maße eintritt, als die Sehsubstanz bereits unterwertig geworden ist. Der durch die Induktion bedingte simultane Selbstschutz eines Sehsubstanzbezirkes ist schon gegeben mit dem Eintritt eines *D*-Überschusses in der Gesamtheit seiner Elemente; der sukzessive Selbstschutz aber ist erst an die Folgen eines bestandenen *D*-Überschusses gebunden.

Es ist mir denkbar, dass gewisse Anomalien des Lichtsinnes ihre Ursache in einer Insuffizienz der Assimilation haben, wie sie z. B. bei mangelhafter Zufuhr des zur Assimilation nötigen Ersatzmateriales eintreten müsste. Eine im Vergleiche zur vorhandenen Beleuchtung des Gesichtsfeldes und der Netzhaut übermäßige und mit herabgesetzter Deutlichkeit des Sehens einhergehende Helligkeit des Sehfeldes braucht nach der hier entwickelten Theorie der Induktion keineswegs, wie dies die jetzt übliche Auffassung will, auf einer übermäßigen »Erregbarkeit« des Sehorgans zu beruhen, sondern lässt sich zwanglos auch auf eine unzulängliche Assimilation der Sehsubstanz zurückführen.

§ 44. Die Abhängigkeit der Helligkeitsunterschiede von der Stärke der Gesamtbeleuchtung. Die Wahrnehmung der Einzelheiten des psychischen Sehfeldes beruht auf den Helligkeitsunterschieden derselben; je größer diese sind, desto leichter ist auch das Unterscheiden.

Hätten wir ein bedrucktes oder beschriebenes weißes Blatt vor uns, auf dem die Buchstaben so weit verblichen sind, dass sich ihre Farbe nur noch eben merklich von der des weißen Grundes unterscheidet, so würden wir, insoweit alle Einzelteile jedes Buchstabens (Haarstriche usw.) noch in dieser Farbe sichtbar wären, die Schrift auch noch mit Sicherheit zu lesen

vermögen; aber solches Lesen wäre schwer und sehr ermüdend. Ohne besondere Aufmerksamkeit könnte es sogar geschehen, dass wir das Papier auf den ersten Blick für ein unbedrucktes halten. Erst wenn der Unterschied zwischen beiden Farben oder Helligkeiten des Buchstaben einerseits, des Papieres andererseits eine gewisse Größe erreicht, wird das Lesen bequem.

Was hier vom Lesen gesagt wurde, gilt vom Sehen überhaupt. Farben- und Helligkeitsunterschiede, die so klein sind, dass wir sie nur bei besonders darauf gerichteter Aufmerksamkeit sehen, und vollends die auch dann nur eben merklichen Unterschiede spielen beim gewöhnlichen Sehen im allgemeinen keine Rolle. Im folgenden haben wir es zunächst nicht mit solchen minimalen, sondern mit den Helligkeitsunterschieden überhaupt zu tun, gleichviel wie groß oder klein sie sind, und zwar mit den Gesetzen ihrer Abhängigkeit von der Gesamtbeleuchtung des Gesichtsfeldes und von der Verteilung der verschiedenen Lichtstärken in ihm und in seinem Netzhautbilde. Beschränken wir uns dabei auf die Fälle, wo für die beiden Elemente des somatischen Sehfeldes, um deren Helligkeitsunterschied es sich handelt, dieselbe Schar der Helligkeitskurven gilt, so können wir unsere Erörterungen unmittelbar an den Inhalt des vorigen Paragraphen und an die daselbst gegebene graphische Darstellung anschließen.

Wenn in zwei Elementen der Sehsubstanz die Wertigkeit dieselbe, und auch J_0 d. i. das endogene Gesamtindukt beider Elemente dasselbe ist, so gilt für letztere dieselbe Schar von Helligkeitskurven. Dabei kann der D-Reiz r und das exogene Gesamtindukt J_r in beiden Elementen verschieden groß sein.

Für zwei gleichweit von der Stelle des direkten Sehens, z. B. symmetrisch nach rechts und links abliegende Netzhautstellen darf man annehmen, dass sie angenähert gleiche Lichtempfänglichkeit dann besitzen werden, wenn sie längere Zeit durchschnittlich gleich stark belichtet waren, und demzufolge ihr Verbrauch an Empfangstoff beiläufig der gleiche war. Dies bedeutet aber, dass auch der D-Reiz für die beiden zugehörigen Stellen der Sehsubstanz durchschnittlich derselbe war, und infolgedessen die Wertigkeit der beiden Stellen ebenfalls gleich ist. In je weiterem Umkreise sich dann auch die Umgebung der beiden Stellen genügend lange Zeit unter durchschnittlich gleichen Bedingungen befand, desto sicherer wird auch das von den Wertigkeiten der Umgebung abhängige endogene Gesamtindukt beiderseits angenähert gleich groß sein. Da aus Gleichheit der Wertigkeit und Gleichheit des endogenen Gesamtinduktes die Gleichheit von D_0 folgt, so gilt also für beide Stellen dieselbe Schar der Helligkeitskurven.

Aber nicht nur für zwei gleichweit vom funktionellen Mittelpunkte der Netzhaut abliegende Stellen wird unter gewöhnlichen Umständen in den zugehörigen Elementen der Sehsubstanz D_0 denselben Wert haben können,

sondern es wird dies auch für die dicht nebeneinander liegenden Elemente eines beliebigen kleinen Feldes der Netzhaut bzw. der Sehsubstanz gelten. Denn die sämtlichen Elemente eines solchen kleinen Netzhautbezirkes werden als nächste Nachbarn sich fast immer unter durchschnittlich denselben Belichtungsbedingungen befunden haben. Ihre Lichtempfänglichkeit wird daher beiläufig dieselbe sein, und da dann auch für die entsprechenden Elemente der Sehsubstanz die D-Reize angenähert dieselben gewesen sind, so werden die Wertigkeiten der Elemente ebenfalls nahezu gleich sein. Da endlich allen Elementen eines kleinen Bezirkes dessen Umgebung gemeinsam ist, so wird auch das endogene Gesamtindukt ziemlich genau gleichen Wert haben können.

Besonderer Berücksichtigung bedarf der zentrale Bezirk der Netzhaut, dessen Bildinhalt beim gewöhnlichen Sehen die Aufmerksamkeit hauptsächlich beschäftigt. Innerhalb dieses Gebietes sind die Verschiedenheiten der Lichtempfänglichkeit voraussichtlich viel erheblicher als auf anderen gleich großen Netzhautfeldern, und es ist hier selbst nach längerer gleicher Belichtung des ganzen Bezirkes nur für gleich weit vom Mittelpunkte entfernte Stellen angenäherte Gleichheit der Wertigkeit zu erwarten. Bezüglich des endogenen Gesamtinduktes gilt jedoch hier für sehr kleine Felder dasselbe, was von kleinen Netzhautbezirken überhaupt zu sagen war.

Nach alledem werden schon beim gewöhnlichen Sehen und ohne besondere vorbereitende Maßregeln Stellen von völliger oder sehr genäherter Gleichheit sowohl der Empfänglichkeit als der Wertigkeit und des endogenen Gesamtinduktes fast immer mehr oder minder zahlreich vorhanden sein. Für alle solche Stellen gilt also gleichzeitig dieselbe Schar von Helligkeitskurven, an denen sich in anschaulicher Weise die Abhängigkeit der Helligkeitsunterschiede von der Stärke der Gesamtbeleuchtung erläutern lässt.

Ist für zwei zu vergleichende Elemente die Größe von D_0 und also auch die Schar der Helligkeitskurven dieselbe, so hängen die beiden Helligkeiten nur noch von den beiden anderen Variabeln, nämlich vom D-Reiz und dem exogenen Gesamtindukt bzw. von n als dem Koeffizienten ab, welchen wir dem Werte von δr geben müssen, um die Größe von J_r zu erhalten; denn es ist hier wieder $J_r = n\,\delta r$.

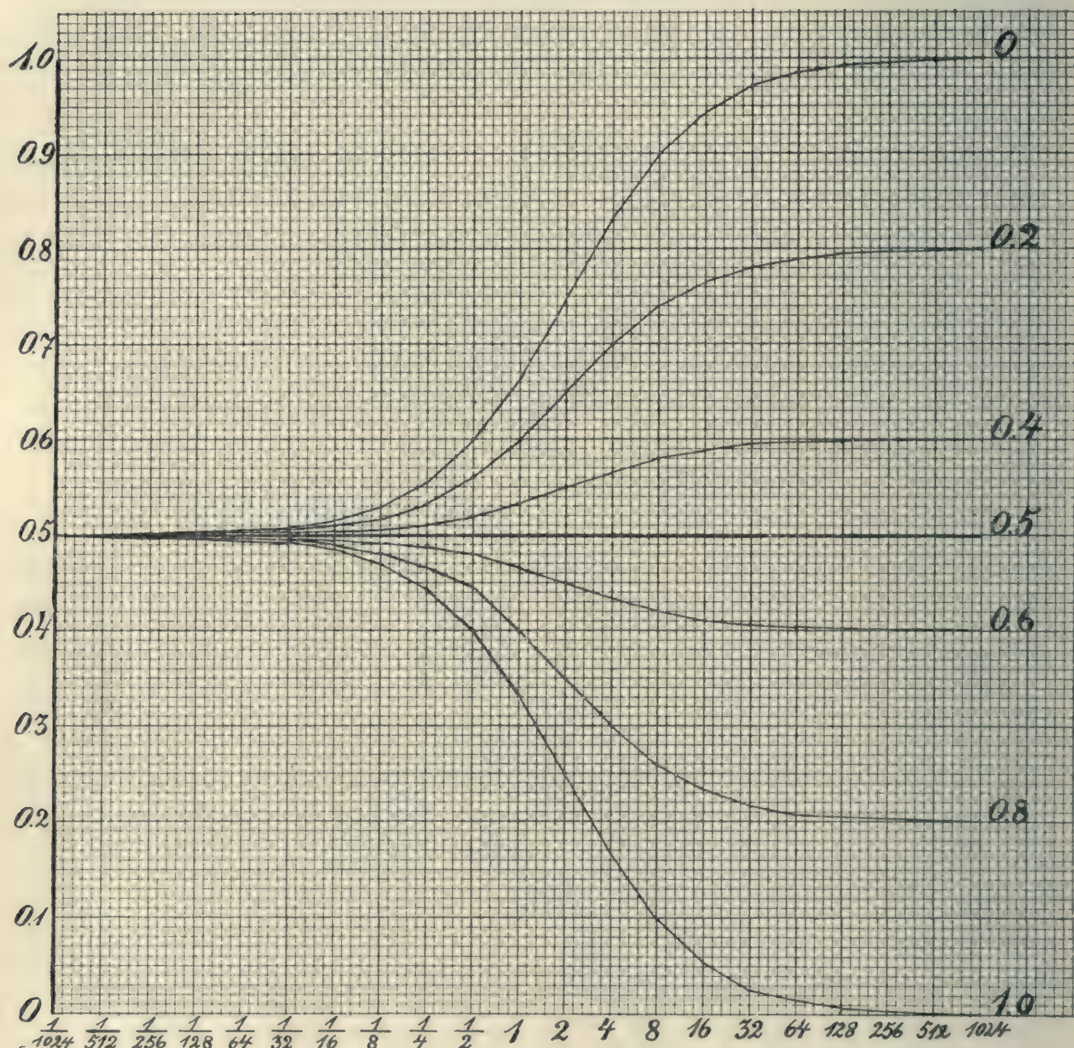
Von vornherein lassen sich die Fälle, wo nur eine dieser Variabeln in beiden Elementen der Sehsubstanz einen verschiedenen, die andere aber gleichen Wert hat, von den Fällen scheiden, wo beide Variabeln verschieden groß sind. Der einfachste Fall läge vor, wenn der Koeffizient n für beide Elemente der gleiche wäre, weil dann für beide eine und dieselbe Kurve aus der gegebenen Kurvenschar gültig wäre (vgl. § 45).

Leicht zu übersehen ist auch der Fall, wo, bei beiderseits gleichem D-Reiz r, für die beiden Elemente (e und $e_,$) zwei verschiedene Koeffizienten (n und $n_,$) gelten (vgl. § 46 a). Minder übersichtlich aber sind die Fälle,

wo sowohl die n-Werte als die r-Werte verschiedene Größe haben, weil hier wieder drei Sonderfälle denkbar sind, nämlich

1. $n > n_{,}$ und $r > r_{,}$
   $n < n_{,}$ und $r < r_{,}$
   in bezug auf den Helligkeitsunterschied ist es dann gleichgültig, welches Element mit e und welches mit $e_{,}$ bezeichnet wird.
2. $n > n_{,}$ und $r < r_{,}$
3. $n < n_{,}$ und $r > r_{,}$

Fig. 36.

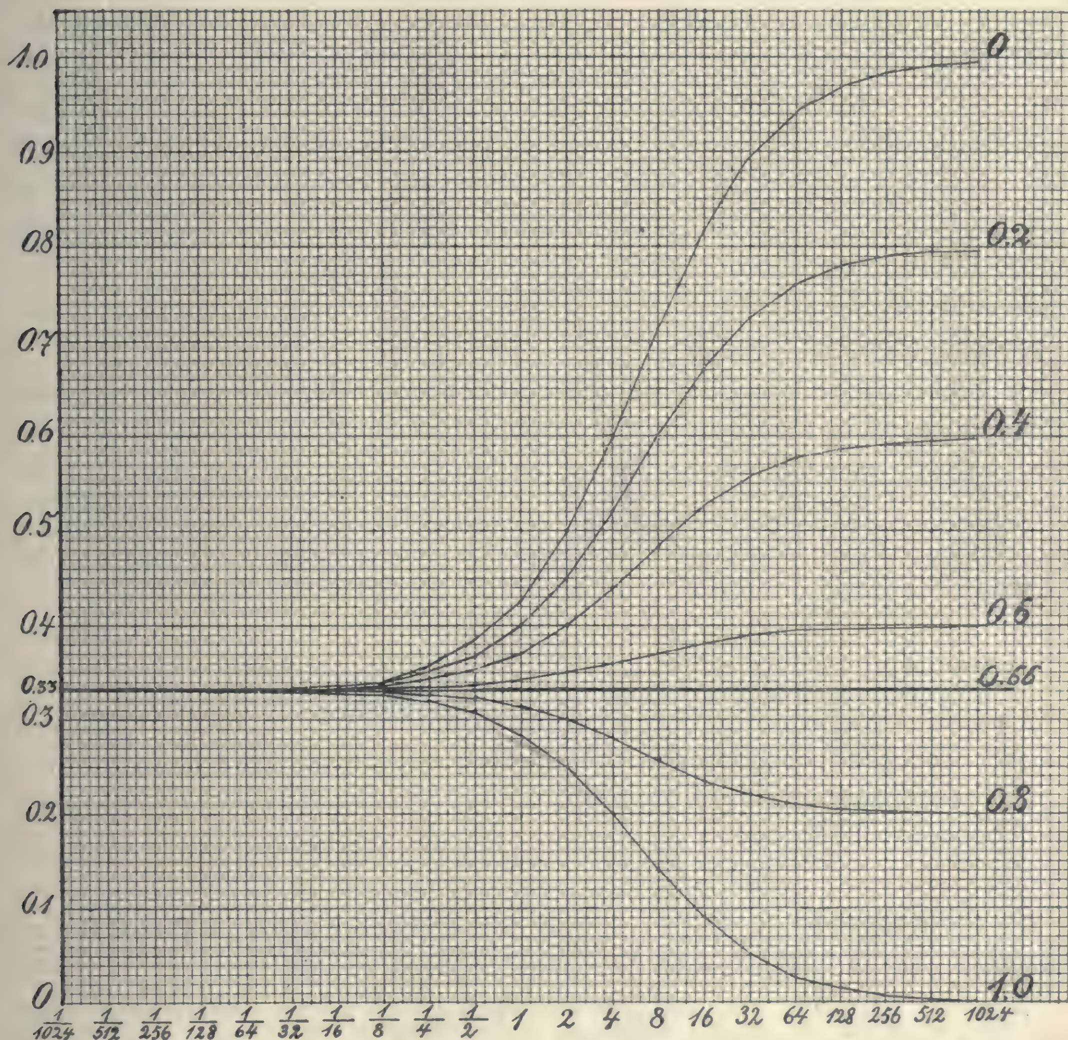


Es würde zu weit führen, alle diese Möglichkeiten eingehend zu behandeln, und ich darf mich um so mehr auf einige mir besonders wesentlich scheinende Fälle beschränken, als die Übereinstimmung der Tatsachen der Erfahrung mit der Theorie schon hier zureichend ersichtlich ist.

Um auf der zum gegebenen Werte von D_0 gehörigen Kurvenschar (Fig. 34 und 35) für ein Element die Helligkeit zu bestimmen, hat man den, seinem D-Reize r entsprechenden Punkt auf der Abszissenachse zu suchen und die ihm zugehörige Ordinatenlinie zu ziehen. Aus der Lage

des Schnittpunktes dieser Ordinatenlinie und der zu demselben Elemente gehörigen Kurve ergibt sich die gesuchte Helligkeit, wenn man den Punkt aufsucht, in welchem die durch jenen Schnittpunkt gelegte Linie gleicher Helligkeit (Isophane) auf die als Ordinatenachse dienende Farbenlinie SW trifft. Jeder der beiden Helligkeiten, um deren Unterschied es sich handelt, entspricht eine andere Isophane, und der auf der Farbenlinie abzulesende Vertikalabstand der beiden Isophanen entspricht dem Unterschiede der beiden Helligkeiten.

Fig. 37.



Ist der D-Reiz für die beiden zu vergleichenden Elemente gleich groß, und nur ihr exogenes Gesamtindukt und mit diesem der n-Wert verschieden, so handelt es sich nur um eine Ordinate und um die beiden Punkte, wo dieselbe die beiden, den Werten von n und $n_{\prime}$ entsprechenden Kurven schneidet. Nicht so übersichtlich sind die übrigen Fälle, wo r und $r_{\prime}$ verschieden sind und also zwei Ordinaten in Betracht kommen. Da der Unterschied der Lichtstärken der beiden zu den Elementen e und $e_{\prime}$ gehörigen Netzhautstellen

mit der Stärke der Gesamtbeleuchtung wächst (vgl. § 16 S. 62), so ist auch auf der Abszissenachse der Abstand der durch die beiden D-Reize r und $r_{\prime}$ gegebenen Ordinatenlinien um so größer, je stärker die Gesamtbeleuchtung ist. Es entspricht daher einer z. B. achtmal stärkeren Gesamtbeleuchtung ein achtmal größerer gegenseitiger Abstand der beiden Ordinaten.

Eine viel bequemere Übersicht über die Art, wie der Unterschied der beiden Helligkeiten bei gesteigerter oder geminderter Gesamtbeleuchtung sich ändert, gestatten die Kurventafeln der Fig. 36 und 37. Auf beiden entsprechen gleichen Abständen zweier Punkte der Abszissenachse gleiche Verhältnisse der durch diese Punkte ausgedrückten Größen des D-Reizes, daher die für die beiden Netzhaut- und Sehfeldstellen geltenden Ordinaten bei allen beliebigen Stärken der Gesamtbeleuchtung denselben gegenseitigen Abstand behalten, während die Ordinatenwerte selbst dieselben geblieben sind, wie für die in Fig. 34 und 35 dargestellten Kurven; der ersteren entspricht Fig. 36, der letzteren Fig. 37. Die Ordinatenachse liegt jetzt links in unendlicher Ferne, doch ist die Farbenlinie an der linken Grenze der Figur angegeben, um auf ihr die Helligkeiten ablesen zu können.

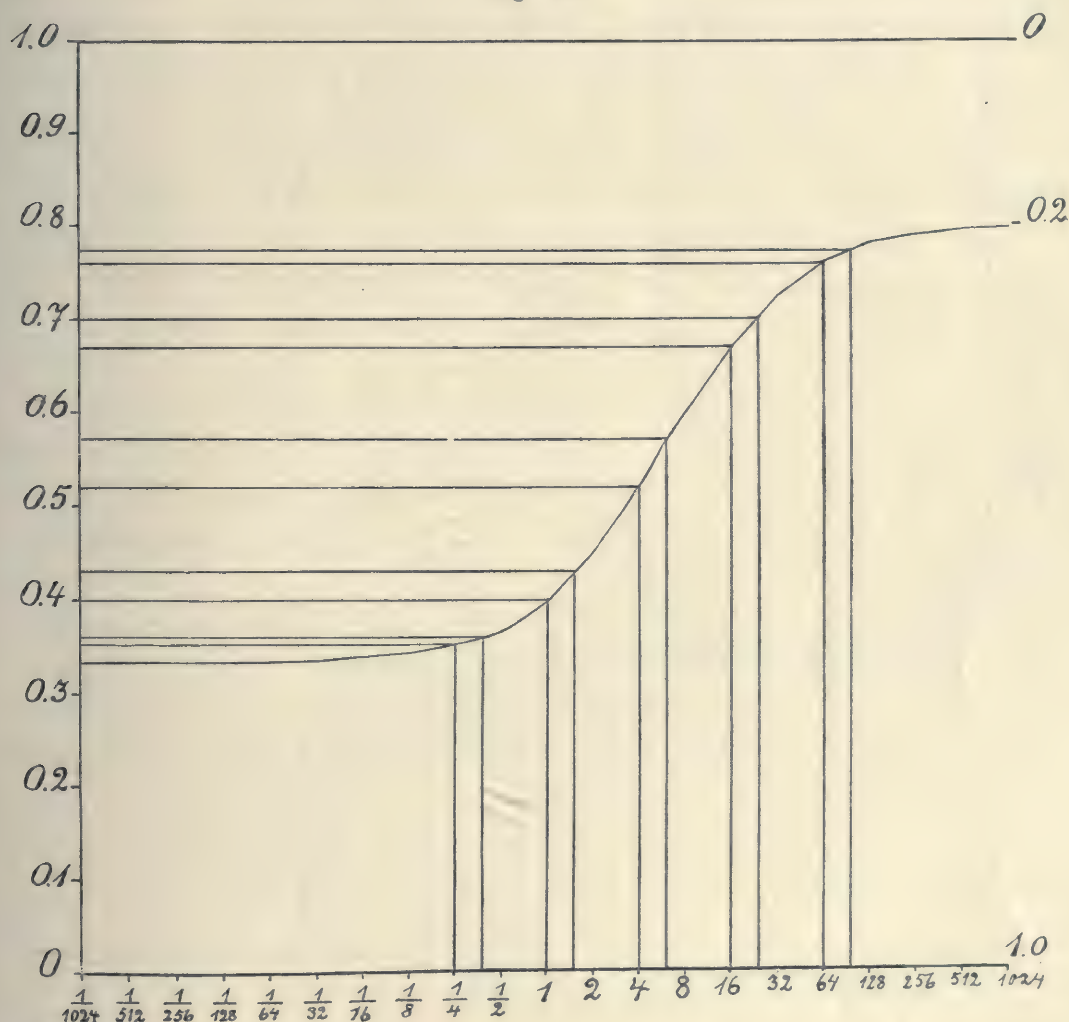
Soll also nicht bloß die Art der Abhängigkeit der Helligkeit von der Gesamtbeleuchtung veranschaulicht werden, sondern der Einfluss der letzteren auf die Größe des Unterschiedes zweier Helligkeiten, welche einem Lichtstärkenpaar von bestimmtem Verhältnis entsprechen, so eignen sich die nach Art der Figg. 36 und 37 dargestellten Kurvenscharen besser als die der Figg. 34 und 35.

§ 45. Die Abhängigkeit der Helligkeitsunterschiede von der Gesamtbeleuchtung bei Gleichheit des endogenen und exogenen Gesamtinduktes und Ungleichheit des D-Reizes der beiden Elemente. Befinden sich zwei Elemente unter den im vorigen Paragraphen angeführten Bedingungen im Zustande gleicher Wertigkeit, und ist nicht nur ihr endogenes, sondern auch ihr exogenes Gesamtindukt gleich, so gilt für sie auch derselbe Wert von n und also nicht nur dieselbe Kurvenschar, sondern auch ein und dieselbe Kurve aus dieser Schar.

Für solche Fälle gibt Fig. 38 ein Beispiel des gewaltigen Einflusses, den die Stärke der allgemeinen Beleuchtung auf den Helligkeitsunterschied der beiden Elemente haben kann. Angenommen, es sei für dieselben die Kurvenschar der Fig. 37 gültig und der gemeinsame n-Wert sei 0,2, so ist die gemeinsame Helligkeitskurve die am rechten Rande der Fig. 37 mit 0,2 bezeichnete. Diese Kurve ist auf Fig. 38 allein wiedergegeben. Auf der Abszissenachse entsprechen wieder gleichen Abständen gleiche Verhältnisse der Reizwerte, und es sind für fünf verschiedene Stärken der Gesamtbeleuchtung die fünf Doppelordinaten eingezeichnet, welche für den Fall gelten, dass die Licht-

stärken bzw. Reizgrößen der beiden Elemente sich wie 1 : 1,6 verhalten. Durch jeden der beiden Punkte, in denen eine Doppel-Ordinatenlinie die Kurven schneidet ist eine Isophane (Linie gleicher Helligkeit) bis zu der linkerseits angegebenen Farbenlinie gezogen, auf welcher jetzt die beiden Helligkeiten abzulesen sind. Der Abstand der beiden Isophanen voneinander entspricht also dem gesuchten Helligkeitsunterschiede.

Fig. 38.

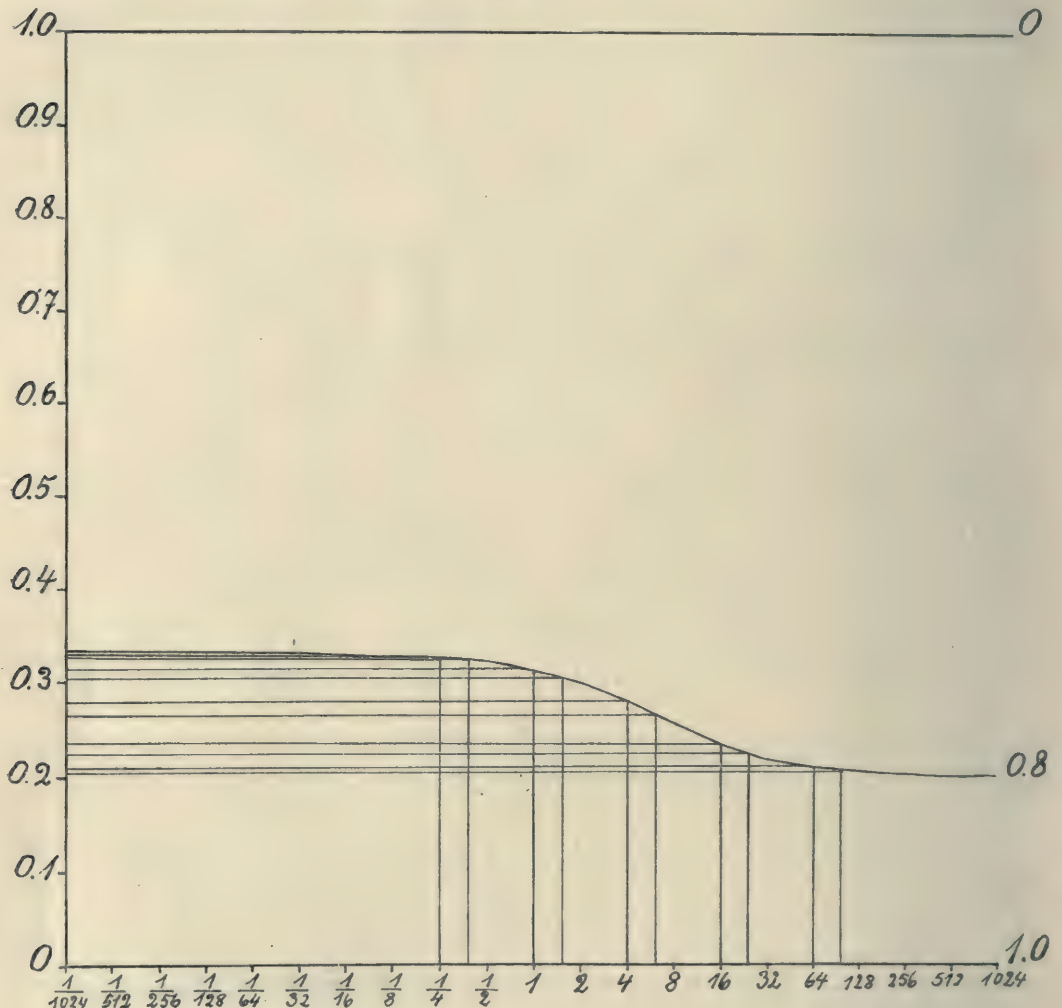


Die den fünf Beleuchtungsstärken entsprechenden Paare der Reizstärken und Helligkeiten sind folgende:

Reizstärken:			Helligkeiten:			Helligkeitsunterschiede:
0,25	u.	0,4	0,3520	u.	0,3625	0,0105
1	»	1,6	0,4000	»	0,4315	0,0315
4	»	6,4	0,5200	»	0,5740	0,0540
16	»	25,6	0,6727	»	0,7089	0,0362
64	»	102,4	0,7600	»	0,7770	0,0170

Der gegenseitige Abstand der einem Reizpaar entsprechenden Ordinaten ist bei allen Reizpaaren gleich, während der Höhenunterschied der zugehörigen Isophanen bei jedem Reizpaar ein anderer ist, am größten bei den Reizstärken 4 und 6,4, am kleinsten bei den beiden absolut kleinsten (0,25 und 0,40) und absolut größten Reizstärken (64 und 102,4).

Fig. 39.



Denken wir uns das Ordinatenpaar mehr und mehr nach links verschoben, so dass die beiden Reizstärken bei gleichbleibendem Verhältnis immer kleiner werden, so sinkt schließlich der Unterschied der beiden Helligkeiten auf Null herab, und beide entsprechen dann der unter den hier angenommenen Umständen geltenden Eigenfarbe des Auges von der Helligkeit 0,333. Denken wir uns dagegen das Ordinatenpaar immer weiter nach rechts verschoben, so dass die beiden Reizstärken mehr und mehr wachsen, so wird der Helligkeitsunterschied schließlich ebenfalls Null, und beide Helligkeiten entsprechen der unter den gegebenen Umständen geltenden

maximalen Helligkeit 0,8. Die größten Helligkeitsunterschiede aber ergeben sich, wenn das Ordinatenpaar die Kurve in der Gegend ihres steilsten Ansteigens schneidet.

Ganz dasselbe gilt auch für alle diejenigen Kurven aus der durch Fig. 37 vertretenen Kurvenschar, welche über der Linie der unveränderlichen Helligkeit verlaufen, deren n-Wert also kleiner als 0,666 ist.

Wenn die beiden Reizstärken eines Paares sich nicht wie 5 : 8, sondern z. B. wie 50 : 51 oder gar wie 100 : 101 verhielten, so lägen ihre Ordinaten einander so nahe, dass sie in unserer Zeichnung zusammenfallen würden. Denken wir uns ein solches Ordinatenpaar wieder entlang der ganzen Abszissenachse verschoben, so würde innerhalb der Strecken, wo die Helligkeitskurve nahezu geradlinig ansteigt, der kleine Unterschied der beiden Ordinatenwerte ein nahezu konstanter bleiben, und also auch der Unterschied der beiden zugehörigen Helligkeiten nahezu unabhängig von der absoluten Größe der beiden Reizstärken sein. Unter solchen besonderen Umständen würde also der Helligkeitsunterschied sich sehr angenähert so verhalten, wie es das Fechner'sche Gesetz fordert.

Als ein Beispiel der Fälle, wo für die beiden Elemente der n-Wert größer ist als 0,666, möge Fig. 39 dienen. Die hier abgebildete Kurve ist wieder derselben Schar entnommen und zwar ist sie identisch mit derjenigen Kurve der Fig. 37, für welche der n-Wert = 0,8 ist. Die fünf Reizstärkenpaare, deren Ordinatenpaare abgebildet sind, haben wieder die oben angegebenen Werte. Der größte Unterschied der beiden Helligkeiten oder wie wir hier sagen dürfen, Dunkelheiten, entspricht jetzt der Gegend der Kurve, wo sie am steilsten abfällt.

Die Zahlenwerte sind folgende:

Reizstärken:			Helligkeiten:			Helligkeitsunterschiede:
0,25	u.	0,4	0,3280	u.	0,3250	0,0030
1	»	1,6	0,3143	»	0,3053	0,0090
4	»	6,4	0,2800	»	0,2645	0,0155
16	»	25,6	0,2364	»	0,2253	0,0111
64	»	102,4	0,2115	»	0,2074	0,0041

Denken wir uns wieder das Ordinatenpaar nach links verschoben, so nimmt der Unterschied der beiden Helligkeiten ab und dieselben nähern sich mehr und mehr der oben erwähnten Helligkeit der Eigenfarbe, während bei der Verschiebung nach rechts der Helligkeitsunterschied ebenfalls immer kleiner wird, aber die beiden Helligkeiten oder Dunkelheiten der unter den gegebenen Bedingungen kleinstmöglichen Helligkeit (0,2) oder größtmöglichen Dunkelheit immer näher kommen.

In Rücksicht darauf, dass nach dem Fechner'schen Gesetze bei gleichbleibendem Verhältnis zweier Reizstärken und gleicher »Erregbarkeit«, wie

solche hier vorausgesetzt wurden, der Unterschied der beiden Helligkeiten von der absoluten Größe der Reizstärken unabhängig sein sollte, war es notwendig, wenigstens an einem Beispiele zu zeigen, wie innerhalb eines gewissen engeren Gebietes der Reizstärken und unter bestimmten Induktionsbedingungen die theoretisch abzuleitenden Helligkeitsunterschiede sich angenähert so verhalten können, wie es das Fechner'sche Gesetz unter allen im Bereiche des normalen Sehens liegenden Umständen fordert.

§ 46. Verschiedenheit der Helligkeit bei gleicher Lichtstärke, und Gleichheit der Helligkeit bei verschiedener Lichtstärke zweier Außendinge. Aus den in Figg. 34—37 dargestellten, theoretisch abgeleiteten Kurven folgt, dass zwei mit somatischen Sehfeldelementen von gleicher Empfänglichkeit und gleicher Wertigkeit gesehene Stellen des Außenraumes

a) trotz gleicher Lichtstärke sehr verschieden hell,
b) trotz sehr verschiedener Lichtstärke gleich hell gesehen werden können,

zwei Sätze, die mit besonderer Deutlichkeit die weitgehende Unabhängigkeit der simultanen Helligkeiten des psychischen Sehfeldes von den Lichtstärken des Gesichtsfeldes zum Ausdruck bringen. Dementsprechend lässt sich auch an diesen Sätzen die Übereinstimmung der Thatsachen mit der Induktionstheorie besonders eindringlich dartun.

a) Denken wir uns bei gegebenem Gesichtsfelde und gegebenem Zustande aller Teile des somatischen Sehfeldes zwei Elemente der Sehsubstanz von gleicher Wertigkeit und gleichem endogenen Gesamtindukt, so wird für beide derselbe Wert von $\frac{D_0}{2}$ und dieselbe Kurvenschar gelten. Wäre dann auch der D-Reiz r für beide Elemente gleich groß, so könnte doch ihr exogenes Indukt eine verschiedene Größe haben, was von der Größe und Verteilung der gleichzeitig wirkenden D-Reize in der Umgebung jedes Elementes abhängt. Für beide Elemente wird also der Wert von δ, von r und von J_0 derselbe, dagegen der Wert von n ein verschiedener sein können, und demgemäß jedem der beiden Elemente eine andere Kurve der gegebenen Kurvenschar entsprechen. Da die Punkte, in denen die zum jeweiligen Reize r gehörige Ordinatenlinie diese beiden Kurven schneidet, auf verschiedenen Isophanen liegen, so ergiebt sich aus dem gegenseitigen Abstand der letzteren der Unterschied der beiden Helligkeiten, in denen die beiden bezüglichen Stellen des Außenraumes erscheinen.

Der Forderung gleicher Wertigkeit und gleichen endogenen Induktes werden, wie wir sahen (§ 44 S. 184), insbesondere zwei symmetrisch zur Stelle des direkten Sehens und nicht allzuweit von derselben abliegende Stellen des somatischen Sehfeldes dann genügen, wenn beide samt ihren Umgebungen zuvor beim Sehen einige Zeit hindurch in gleicher Weise in

Anspruch genommen waren, wie dies bei zwangloser Betrachtung einer genügend ausgebreiteten und überall gleich lichtstarken Fläche der Fall ist. Auch die Lichtempfänglichkeit zweier solcher Stellen wird dann dieselbe sein können, so daß bei einer nachfolgenden beliebigen gleichstarken retinalen Belichtung derselben auch der D-Reiz r für die bezüglichen Elemente der Sehsubstanz beiderseits der gleiche sein wird. Dabei kann das exogene Indukt und also auch n und $n_{\prime}$ für beide Stellen von sehr verschiedener Größe sein, wenn die Umgebung der einen Stelle des Gesichtsfeldes bezw. ihres Netzhautbildes von relativ großer, die Umgebung der anderen aber von relativ kleiner Lichtstärke ist. Wir haben es dann auf der Kurventafel mit nur einer Ordinate, aber mit zwei weit auseinander laufenden Kurven zu tun, deren eine oberhalb, die andere unterhalb der Linie unveränderlicher Helligkeit gelegen ist.

Dass unter solchen Umständen zwei symmetrisch zum Blickpunkte liegende Stellen des Außenraumes trotz ihrer gleichen Lichtstärke gleichzeitig in verschiedener tonfreier Farbe und Helligkeit gesehen werden können, haben schon (§ 26 S. 116) die auf Taf. II befindlichen Fig. 1, 2 und 3 gezeigt. Auf denselben erscheinen zwei kleine Felder von gleicher Lichtstärke lediglich infolge ihrer verschiedenen Umgebung auch dann verschieden hell, wenn wir in der schon damals beschriebenen Weise dafür gesorgt haben, dass die beiden bezüglichen Stellen des somatischen Sehfeldes sich unmittelbar vor dem Sichtbarwerden der Figuren in gleichem Zustande befinden. Allerdings handelt es sich in diesen Fällen nicht bloß um zwei Elemente, sondern jederseits um eine zusammenhängende Gruppe von Elementen, die sich jedoch sämtlich unmittelbar vor dem Sichtbarwerden der Figur angenähert in demselben Zustande befinden. Überdies entspricht jedem einzelnen Elemente der einen Gruppe ein symmetrisch gelegenes der anderen, und für jedes solche Elementenpaar gilt ganz besonders das oben Geforderte.

Immerhin erscheinen in Fig. 1 und 3 (Taf. II) die Helligkeiten der beiden grauen Felder trotz der großen Verschiedenheit ihrer Umgebungen noch keineswegs so verschieden, wie dies unter noch günstigeren Bedingungen der Fall sein könnte.

Die in Fig. 35 dargestellte, einem Fall allgemeiner Unterwertigkeit entsprechende Kurvenschar zeigt, dass demselben Abszissenwerte auf der zugehörigen Ordinatenlinie als einer Linie gleicher Lichtstärke außerordentich verschiedene Helligkeiten entsprechen können, um so mehr, je stärker die Gesamtbeleuchtung und der zu ihr proportionale Wert von r ist. In der That ist es möglich, von zwei kleinen, gleich lichtstarken Feldern, das eine noch viel dunkler und gleichzeitig das andere noch viel heller zu sehen, als wie dies bei Betrachtung der Fig. 1 (Taf. II) der Fall ist; man braucht nur die Felder noch kleiner und die Verschiedenheiten der Lichtstärken ihrer Umgebungen noch größer zu machen, als in jener Figur.

Fig. 40.

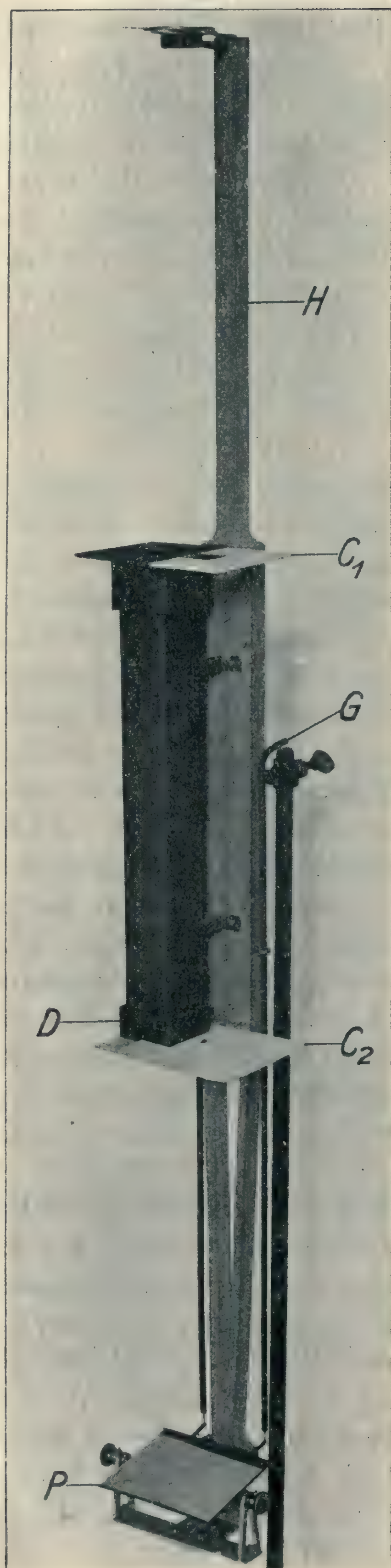
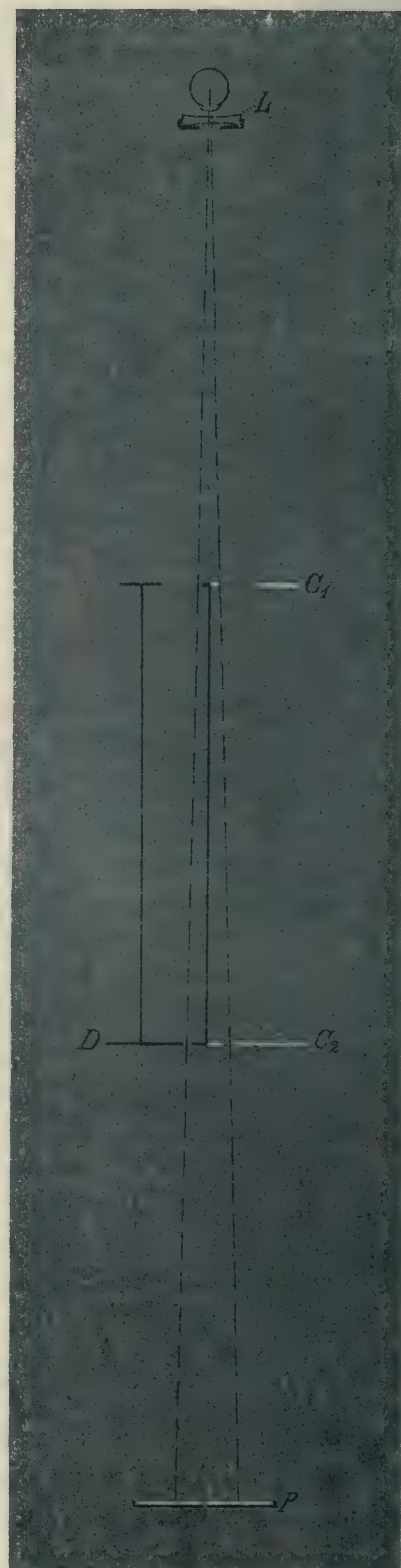


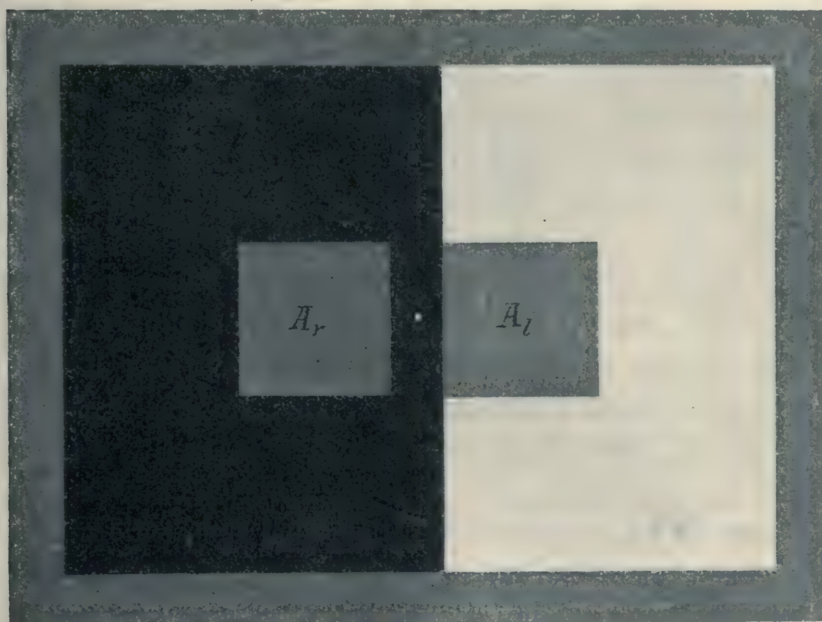
Fig. 41.



Das Vorurteil, nach welchem die Helligkeit einer Gesichtsfeldstelle bei derselben »Erregbarkeit« des Sehorganes im wesentlichen nur von der Lichtstärke abhängen soll, und etwaige Abweichungen von diesem vermeintlichen Gesetz als etwas Nebensächliches zu gelten haben, beherrscht noch immer die Darstellungen der Lehre vom Lichtsinn. Deshalb sei hier noch eine Einrichtung beschrieben, bei der man mit zwei gleichbeschaffenen (gleich »erregbaren«) somatischen Sehfeldstellen gleichzeitig die eine von zwei gleich lichtstarken Gesichtsfeldstellen schwarz, die andere weiß zu sehen vermag.

Eine 90 cm lange, vertikal stehende Holzleiste (*H* Fig. 40) wird von einem eisernen Stativ gehalten, an dem sie in vertikaler Richtung verschieblich ist. Sie trägt entlang ihrem mittleren Dritteil ein 30 cm langes, mit

Fig. 42.



schwarzem Samt ausgekleidetes, im Querschnitt quadratisches (30 × 30 mm) Dunkelrohr, das am unteren Ende durch einen mit kleinem Loch (s. u.) versehenen geschwärzten Deckel geschlossen ist. Dieses Dunkelrohr ist an der Leiste derart angebracht, dass die Ebene einer seiner senkrechten Wände die Holzleiste in deren Längsmittellinie rechtwinkelig schneidet und mit der Längsmittelebene des ganzen Apparates zusammenfällt, so dass sich also das Dunkelrohr auf der einen Seite dieser Längsmittelebene befindet. Die Unterfläche seines eben erwähnten Deckels setzt sich nach der anderen Seite hin in die Fläche eines horizontalen Kartons (9 × 9 cm) fort, der auf seiner oberen Fläche mit mattweißem Barytpapier überzogen und in Fig. 40 mit C_2 bezeichnet ist. Sowohl in diesem Karton als im unteren

Deckel des Dunkelrohres befindet sich in 12,5 mm Abstand von der Längsmittelebene des Apparates ein rundes Loch von 3 mm Durchmesser.

Nach oben mündet das Dunkelrohr auf der schwarzen Hälfte eines Kartons (C_1 Fig. 40 u. 41) von 8 $\times$ 11 cm Fläche in einem quadratischen Ausschnitte (A Fig. 42) von 24 mm Seitenlänge. Ein ganz gleicher Ausschnitt befindet sich in der anderen weißen Hälfte des Kartons, so dass beide Ausschnitte symmetrisch zu beiden Seiten der Längsmittelebene des Apparates liegen und durch einen 8 mm breiten schwarzen Steg voneinander getrennt sind. Im Mittelpunkte dieses Steges befindet sich eine deutliche weiße Marke (Fig. 42).

An ihrem oberen Ende trägt die Holzleiste an einem kurzen Stiele einen horizontalen Metallring, in welchen eine Glaslinse (L) eingelegt werden kann, und dessen Mittelpunkt lotrecht 30 cm über der soeben erwähnten Marke des Steges liegt. Der Beobachter hat diejenige Zerstreuungslinse zu wählen, welche seinen Nahepunkt auf 60 cm Abstand vom Auge bringt, so dass er zwar die beiden Löcher im unteren Deckel des Dunkelrohres und im Karton C_2 scharf sehen kann, aber nur unscharf die weiße Marke zwischen den quadratischen Ausschnitten des oberen Kartons C_1. Fig. 41 zeigt die ganze Vorrichtung in einem schematischen Querschnitte.

30 cm unterhalb des Kartons C_2 befindet sich eine Metallplatte P (7 $\times$ 10 mm), welche mit Hilfe eines bis in die mittle Höhe des Apparates reichenden und dort mit einem Handgriff (G Fig. 40) versehenen dünnen Stabes um eine horizontale Achse gedreht werden kann. Auf diese Metallplatte wird ein mattes graues Papier von entsprechender Größe aufgelegt, dessen Lichtstärke durch Änderung seiner Neigung gegen das durch ein Fenster einfallende Himmelslicht innerhalb ziemlich weiter Grenzen variiert werden kann.

Bringt man ein Auge nahe an den Ring, und fixiert die wegen der Linse verwaschen erscheinende Marke, so sieht man einerseits die tiefschwarz erscheinende quadratische Öffnung des Dunkelrohres umrahmt von der schwarzen Hälfte des oberen Kartons, auf der anderen Seite die quadratische Öffnung der weißen Kartonhälfte und durch diese Öffnung hindurch einen Teil des unteren weißen Kartons. Rechts und links vom Stege erscheinen scharf umrissen die beiden kleinen Löcher, deren eines sich im unteren Deckel des Dunkelrohres, das andere in dem unteren Karton C_2 befindet. Liegt jetzt auf der unteren Metallplatte ein graues Papier von passender Lichtstärke, so erscheint das vom tiefen Schwarz des Dunkelrohres umgebene Loch weiß, das vom Weiß des unteren Kartons umgebene Loch schwarz, obwohl beide Löcher ganz dasselbe Licht des unter ihnen liegenden grauen Papieres empfangen. Hatte ich an einem hellen Tage den Apparat in der Nähe eines großen hohen Fensters aufgestellt und ein mattgraues Papier, dessen

Remissionsvermögen $^{60}/_{360}$ von der des weißen Barytpapiers betrug, auf die horizontal eingestellte Metallplatte gelegt, so sah ich das eine Loch ebenso schwarz wie das auf dem oberen Karton befindliche schwarze Wollpapier (von $^{6}/_{360}$ Remissionsvermögen), das andere Loch ebenso weiß, wie das daselbst befindliche weiße Barytpapier. Um die beiden Stellen des somatischen Sehfeldes, auf welche die Lochbilder fallen, in gleiche Stimmung zu bringen, bedeckt man in der schon § 26 S. 118 beschriebenen Weise den oberen Karton mit zwei in der Längsmittelebene des Apparates zusammenstoßenden weißen Blättern, fixiert eine am Rande des einen Blattes befindliche Marke, welche genau über die Marke des Steges zu liegen kommt, und zieht dann die Deckblätter nach rechts und links zur Seite.

Ich konnte also mit Hilfe der beschriebenen Vorrichtung von zwei kleinen symmetrisch zum Längsmittelschnitt auf der Netzhaut abgebildeten ganz gleich lichtstarken Feldern das eine so hell wie ein weißes, und das andere so dunkel wie ein schwarzes Papier sehen, deren Lichtstärken sich wie 1 : 60 verhielten. Davon, daß auf der Netzhaut die Lichtstärken der beiden Lochbilder infolge des falschen Lichtes (vgl. § 33) nicht ganz gleich sind, sondern das schwarz erscheinende Loch im Weiß sogar etwas lichtstärker ist, als das weiß erscheinende Loch im Schwarz, habe ich hier abgesehen.

Um eine mehrfache Verwendbarkeit des Apparates zu ermöglichen, wurde die untere Metallplatte in ähnlicher Weise, wie dies an dem in Fig. 22 (§ 27) abgebildeten Apparate beschrieben wurde, in zwei Hälften geteilt, die durch einen Riegel zusammengehalten sind, nach dessen Lösung jede Hälfte unabhängig von der anderen durch einen Handgriff (*G* Fig. 40) um eine horizontale Achse gedreht werden kann. Hierdurch wird ihre Lage relativ zur Einfallsrichtung des Himmelslichtes und zugleich die Lichtmenge verändert, welche von dem aufliegenden Papier ins Auge geschickt wird.

b) Auch der zweite oben angeführte wichtige Satz, nach welchem zwei Gesichtsfeldstellen von sehr ungleicher Lichtstärke mit zwei gleich beschaffenen Stellen des somatischen Sehfeldes gleich hell gesehen werden können, lässt sich mit der oben beschriebenen Vorrichtung noch auffallender beweisen, als mit dem in Fig. 22 (§ 27) abgebildeten Apparate. Statt die ganze untere Metallplatte mit dem grauen Papier zu bedecken, bedeckt man die eine, auf der Seite des Dunkelrohres liegende Hälfte mit einem matten schwarzen, die andere mit einem passend ausgewählten matten weißen Papier, was freilich voraussetzt, dass man eine Reihe weißer und schwarzer Papiere von gut abgestuftem Remissionsvermögen zur Verfügung hat. Das benutzte weiße Papier muss jedenfalls lichtschwächer sein als das weiße Normalpapier, in welchem sich das Loch befindet, das schwarze kann eines der käuflichen mattschwarzen Papiere sein, oder es kann an seiner Stelle auch eine dicht berußte Fläche benutzt werden. Ich wählte z. B. gegen

Mittag eines wolkenlosen Tages ein kaum ins Grau spielendes mattweißes Papier, dessen Remissionsvermögen sich zu dem des weißen Barytpapieres wie 282 : 360 verhielt, und ein schwarzes Wollpapier von $^6/_{360}$, und sah beide Löcher als ein beiderseits gleich helles Grau, obwohl die Lichtstärke des einen Loches 47mal größer war, als die des anderen.

Es kommt bei dem letzteren Versuche sehr viel darauf an, dass die Ebene der beiden Kartonflächen und der Metallplatte sämtlich horizontal, und dass sie alle drei gleich stark beleuchtet sind. Man erreicht letzteres, wenn der Apparat in einem passend gewählten Abstande vor einem hohen Fenster aufgestellt wird, das eine weder durch Bäume noch durch Häuser behinderte Aussicht auf den Himmel gestattet.

§ 47. Die Abhängigkeit der Helligkeitsunterschiede von der Gesamtbeleuchtung bei ungleichem *D*-Reize und ungleichem exogenen Gesamtindukt. So oft es sich um die Deutlichkeit des Sehens tonfreier Bilder (Zeichnungen, Lithographien, Kupferstiche, Photographien), um Messungen der Sehschärfe, um photometrische Bestimmungen u. s. w. handelt, kommen die Helligkeitsunterschiede nahe benachbarter oder einander unmittelbar berührender Stellen des psychischen Sehfeldes und zwar insbesondere seines zentralen Teiles in Betracht. Befanden sich unmittelbar vor Empfang des Netzhautbildes der genannten Außendinge zwei zu benachbarten, aber ungleich lichtstarken Stellen gehörige Elemente des kleinen fovealen Bezirkes des somatischen Sehfeldes im Zustande gleicher Empfänglichkeit, gleicher Unterwertigkeit und gleichen endogenen Induktes, so haben wir den in § 44 S. 186 erwähnten Fall vor uns, wo für zwei Elemente dieselbe Kurvenschar gilt, jedoch sowohl der *D*-Reiz als auch der Wert von n verschieden ist.

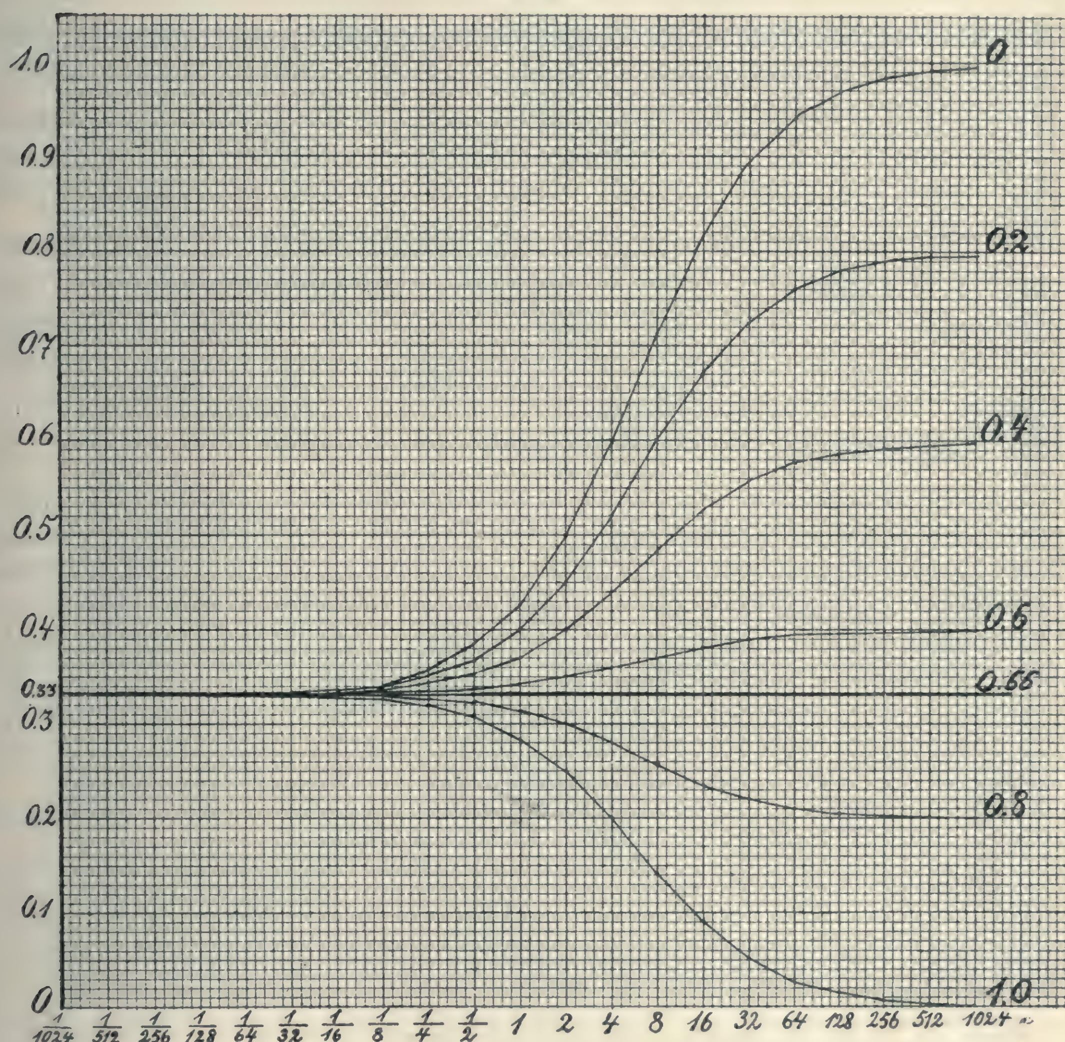
Wollen wir wieder zur Veranschaulichung der Abhängigkeit der Helligkeitsunterschiede von der Stärke der Gesamtbeleuchtung die Kurvenschar der Fig. 43 (einer Kopie der Fig. 37) benutzen, so haben wir es mit zwei, den beiden Elementen e und e_1 zugehörigen Kurven und mit zwei, den beiden *D*-Reizen r und r_1 entsprechenden Ordinatenlinien zu tun, welche letzteren einen bei allen möglichen Stärken der Gesamtbeleuchtung gleichbleibenden gegenseitigen Abstand haben.

Hierbei sind vier Möglichkeiten zu unterscheiden:

1. die eine Kurve liegt über, die andere unter der Linie der unveränderlichen Helligkeit;
2. dem einen Elemente entspricht die Linie der unveränderlichen Helligkeit, dem anderen eine ober- oder unterhalb jener Linie liegende Kurve;
3. beide Kurven liegen über der Linie der unveränderlichen Helligkeit;
4. beide Kurven liegen unter der Linie der unveränderlichen Helligkeit.

Für die ersten zwei Fälle ergiebt die Betrachtung der Fig. 43 sofort, dass der Unterschied der den Elementen e und $e_{,}$ entsprechenden Helligkeiten um so größer sein muss, je stärker die Gesamtbeleuchtung des Gesichtsfeldes bezw. der Netzhaut ist. Denn der Schnittpunkt einer Ordinatenlinie mit einer beliebigen Kurve der Schar hat einen um so größeren Abstand von der Linie der unveränderlichen Helligkeit, je weiter die Ordi-

Fig. 43.



natenlinie nach rechts liegt d. h. je größer der D-Reiz ist, zu dem die Ordinatenlinie gehört. Entspricht also einem der beiden Elemente die Linie gleicher Helligkeit und dem anderen eine beliebige Kurve, so bleibt die dem einen Elemente zugehörige Helligkeit bei allen Beleuchtungsstärken dieselbe, während die dem anderen zugehörige um so mehr von dieser Helligkeit nach oben oder nach unten abweicht, je stärker die Gesamtbeleuchtung ist. Liegt die Kurve des einen Elementes über, die des anderen unter der Linie der unveränderlichen Helligkeit, so weicht die zur ersteren

gehörige Helligkeit um so mehr nach oben, die zur anderen gehörige gleichzeitig um so mehr nach unten von der Linie der unveränderlichen Helligkeit ab, je stärker die Gesamtbeleuchtung. Mit der letzteren wächst also in allen drei Fällen der fragliche Helligkeitsunterschied.

Nicht so einfach verhält es sich in den Fällen 3. und 4., wo die Kurven beider Elemente oberhalb oder unterhalb der Linie unveränderlicher Helligkeit gelegen sind. In solchen Fällen wächst zwar, wenn man von der schwächsten Gesamtbeleuchtung ausgeht, der Helligkeitsunterschied zunächst auch mit der Stärke der Gesamtbeleuchtung, erreicht aber bei einer ganz bestimmten Stärke der letzteren ein Maximum, um darüber hinaus wieder abzunehmen bis zu jener Beleuchtungsstärke, wo er sich praktisch genommen nicht mehr ändert, weil beide Kurven bereits ihre Asymptoten nahezu erreicht haben. Mit Hilfe unserer Helligkeitsformel (S. 172) lässt sich dies leicht dartun, wenn man für ein gegebenes Verhältnis zwischen den zu e und e_1 gehörigen D-Reizwerten die entsprechenden Helligkeiten bei verschiedenen Stärken der Gesamtbeleuchtung berechnet. Liegen beide Kurven über der Linie der unveränderlichen Helligkeit, so kommt dem stärker belichteten Elemente der kleinere Wert von n zu; umgekehrt verhält es sich, wenn beide Kurven unterhalb jener Linie liegen.

Angenommen dem Elemente e entspräche die zum n-Werte 0,2, dem Elemente e_1 die zum n-Werte 0,4 gehörige Kurve, und die D-Reize der beiden Elemente verhielten sich wie 1 : 4. Wäre unter solchen Umständen der D-Reiz für e gleich 2, der D-Reiz für e_1 gleich $^1/_2$, so entspräche dem Elemente e die Helligkeit 0,45, dem Elemente e_1 die Helligkeit 0,354, und der Unterschied beider Helligkeiten wäre gleich 0,096. Wäre der D-Reiz für e gleich 8, für e_1 gleich 2, so entspräche ersterem die Helligkeit 0,6, letzterem die Helligkeit 0,4, und der Unterschied betrüge 0,2. Wäre für e der D-Reiz gleich 32, der D-Reiz für e_1 gleich 8, so entspräche ersterem die Helligkeit 0,7263, letzterem die Helligkeit 0,4857, und ihr Unterschied wäre 0,2406. Betrügen die beiden Reizwerte 128 und 32, so entsprächen dem die Helligkeiten 0,7791 und 0,5579, und der Unterschied 0,2212; der letztere wäre also bereits wieder kleiner als er bei den Reizwerten 32 und 8 war; und bei noch größerer Stärke der Gesamtbeleuchtung müsste er sich immer mehr dem Unterschiede 0,2 nähern, welcher durch den Abstand der beiden Asymptoten der beiden Kurven gegeben ist.

Bei photometrischen Bestimmungen handelt es sich um Verhältnisse zwischen den beiden Lichtstärken, welche dem Verhältnis 1 : 1 viel näher liegen, als das soeben beispielsweise benutzte Verhältnis 1 : 4. Beim Rechnen gewöhnt man sich, die verschiedenen Verhältnisse zwischen zwei Werten als zwei verschiedene Größen zu nehmen und Verhältnisse durch Brüche auszudrücken. Macht man dabei den kleineren Wert zum Zähler, den größeren zum Nenner, so lässt sich jedes mögliche Verhältnis durch einen echten Bruch bezeichnen, und es hat dann, rechnerisch genommen, einen Sinn, wenn man z. B. dem Verhältnis $\frac{11}{13}$ einen größeren Wert beimisst,

als dem Verhältnis $\frac{11}{100}$. Setzt man statt des kleineren den größeren Wert in den Zähler, und erhält so die beiden unechten Brüche $\frac{13}{11}$ und $\frac{100}{11}$, so misst man dem letzteren einen größeren Wert bei als dem ersteren. Im Grunde genommen wird an den beiden Verhältnissen als solchen durch die verschiedene Ausdrucksweise nichts geändert. Nur die Art unseres Rechnens nötigt dazu, Verhältnisse als Größen in die Rechnung einzusetzen. Demgemäß will ich, wenn die beiden, für die Elemente e und e_1 in Betracht kommenden Lichtstärken sich z. B. in einem Falle wie 1 : 4 im andern wie 99 : 100 verhalten, ihr Verhältnis letzterenfalles als das größere bezeichnen, indem ich die kleinere Lichtstärke als den Zähler eines Bruches nehme.

Je »größer« das Verhältnis der für zwei Elemente von gleicher Empfänglichkeit, gleicher Wertigkeit und gleichem endogenen Gesamtindukt geltenden Lichtstärken ist, desto näher liegen sich die zu den beiden Reizwerten dieser Elemente gehörigen Ordinatenlinien. Schon beim Verhältnis 50 : 51 würden diese beiden Linien in der Zeichnung (Fig. 43) zusammenfallen, es sei denn, dass wir dieselbe nach einem entsprechend großen Maßstabe ausführen wollten.

Ähnlich verhält es sich aber auch mit den beiden Helligkeitskurven, welche unter den hier angenommenen Umständen zu den beiden Sehfeldelementen gehören würden. Dem vom stärkeren D-Reize getroffenen Elemente e entspricht wieder, wie in dem vorhin näher besprochenen Falle, der kleinere Wert von n; aber für das schwächer belichtete Element e_1 ist jetzt der n-Wert nur wenig kleiner, seine Helligkeitskurve liegt also der Kurve des Elementes e sehr nahe. Die beiden Kurven fallen, sobald der Unterschied der beiden n-Werte zu klein wird, in der Zeichnung ebenfalls zusammen, wenngleich theoretisch genommen die Kurve des Elementes e immer höher liegen muss als die des Elementes e_1. Liegen aber die Helligkeitskurven der beiden Elemente einander so nahe, dann gilt für die beiden Elemente sehr angenähert das, was in § 45, S. 191 für den Fall auseinandergesetzt wurde, wo wirklich nur eine einzige Kurve in Betracht kam und das Verhältnis zwischen den D-Reizen der beiden Elemente dem Verhältnisse 1 : 1 ebenfalls sehr angenähert war.

So führt unsere Betrachtung zu dem wichtigen Ergebnis, dass, wenn das Verhältnis zwischen den D-Reizen zweier somatischer Sehfeldelemente von gleicher Empfänglichkeit, gleicher Wertigkeit und gleichem endogenen Gesamtindukt sich dem Verhältnis 1 : 1 nähert, der Unterschied der beiden, diesen Elementen im psychischen Sehfelde zukommenden Helligkeiten bei einer ganz bestimmten Stärke der Gesamt-

beleuchtung am größten ist, wie dies in § 45 auseinandergesetzt wurde. Wäre bei diesem Optimum der Gesamtbeleuchtung dieser Helligkeitsunterschied bereits nur bei besonderer Aufmerksamkeit noch merklich, so würde sowohl eine Verstärkung als eine Abschwächung der Gesamtbeleuchtung ihn vollends unbemerklich machen.

Die bloße Anschauung einer Kurvenschar, wie sie Fig. 43 beispielsweise zeigt, lehrt uns, dass bei einem so großen Verhältnis zwischen den beiden D-Reizen der bezügliche Helligkeitsunterschied um so größer ist, je steiler die auf der Zeichnung als einfache Kurve erscheinende Doppelkurve an der Stelle verläuft, wo sie von der auf der Zeichnung ebenfalls nur einfach erscheinenden doppelten Ordinatenlinie durchkreuzt wird. Die Steilheit der Doppelkurve aber ist bei gleichen n-Werten um so größer, je größer die Unterwertigkeit der beiden Elemente ist, denn um so tiefer liegt der Ausgangspunkt der Kurvenschar auf der Ordinatenachse (vgl. z. B. Fig. 35 und 37).

Hieraus folgt also, dass das Verhältnis der auf die beiden Elemente e und e_1 wirkenden D-Reize sich dem Verhältnis 1 : 1 um so mehr nähern kann, ohne unbemerklich zu werden, je größer die Unterwertigkeit der beiden zugehörigen Elemente der Sehsubstanz ist, mit anderen Worten, dass die Deutlichkeit unseres Sehens einen um so höheren Grad erreichen kann, je vorgeschrittener die sukzessive Helladaption der Sehsubstanz ist.

So ergibt sich also aus unserer Theorie dasselbe, was schon in § 18 aus den Tatsachen der täglichen Erfahrung abgeleitet wurde, dass nämlich jedem Anpassungszustande eine besondere, für diesen Zustand optimale Beleuchtungsstärke entspricht, bei welcher das Auge das unter den gegebenen Verhältnissen mögliche Maximum der Deutlichkeit des Sehens erreicht, und dass ein für schwache Beleuchtung angepasstes Auge bei keiner und also auch nicht bei der für seinen Zustand optimalen Beleuchtungsstärke so hohe Deutlichkeitsgrade des Sehens erreicht, wie ein für stärkere Beleuchtung angepasstes.

Auch ist hier auf die in § 20 beschriebenen Versuche zu verweisen, bei denen vor jeder Einzelbeobachtung durch längere Betrachtung einer Fläche von überall gleicher Lichtstärke soweit möglich für die Gleichartigkeit des zentralen Sehfeldbezirkes gesorgt war, und deren Ergebnisse mit der hier entwickelten Lehre durchaus in Übereinstimmung, mit Fechner's Lehre aber zum größeren Teile unverträglich sind.

§ 48. **Über die durch örtliche Änderungen der Netzhautbelichtung bedingten Helligkeitsänderungen.** In § 39 und ff. wurden die von den Änderungen der allgemeinen Netzhautbeleuchtung abhängigen Helligkeitsänderungen im psychischen Sehfelde besprochen; jetzt handelt es

sich um Helligkeitsänderungen, welche bei örtlich beschränkten Beleuchtungsänderungen der Netzhaut eintreten. Ich setze dabei wieder ein stabiles Gesichtsfeld und ein ebensolches somatisches Sehfeld voraus (vgl. § 39) und nehme also an, dass, abgesehen von der erwähnten Belichtungsänderung alles hier in Betracht kommende unverändert bleibt.

Die Gesamtheit aller Elemente der Sehsubstanz stellt ein derart in sich zusammenhängendes System dar, dass eine Änderung im Zustande eines Elementes vermöge der induzierenden Wechselwirkungen auch in jedem anderen Elemente des Systems eine Zustandsänderung mit sich bringt. Dieselbe besteht in einer Größenänderung seiner Dissimilation und Assimilation und bedingt sowohl eine Änderung des Unterschiedswertes D-A, als des Verhältnisses $D:A$. Von letzterem hängt die (psychische) Farbe und Helligkeit ab, von ersterem das (somatische) Indukt, welches von einem Element im anderen induziert wird.

Wäre uns bei belichteter Netzhaut für jedes Element derselben seine Belichtung und Empfänglichkeit und zugleich die Wertigkeit des ihm zugehörigen Elementes der Sehsubstanz gegeben, so wäre damit auch für jedes Element der letzteren die Größe seiner Dissimilation und Assimilation, das Verhältnis beider zueinander und ihr Unterschiedswert gegeben.

Es gilt nun, mit einem gegebenen ersten Gesamtzustand des Systems den zweiten zu vergleichen, welcher durch veränderte Belichtung eines Teiles der Netzhaut herbeigeführt wird.

Bestände das System nur aus zwei Elementen, so ließe sich ebenfalls ein Zustand dieses zweigliederigen Systemes als gegeben annehmen und mit demjenigen Zustande vergleichen, in welchen die beiden Elemente versetzt würden, sobald bei gleichgebliebener Wertigkeit derselben der D-Reiz r in einem der beiden geändert wäre.

Aus der für den soeben angenommenen Fall bereits in § 38 entwickelten Gleichung (5) ergab sich (S. 166, II), dass jeder positive (oder negative) Zuwuchs zum Reize r des einen Elementes e einen zu diesem Reizzuwuchs proportionalen negativen (oder positiven) Zuwuchs zum Indukte i desselben Elementes, dagegen im anderen Elemente $\boldsymbol{e}$ einen proportionalen positiven (oder negativen) Zuwuchs zum Indukte $\boldsymbol{i}$ dieses Elementes bedingt. Hieraus folgt, dass die durch einseitige Reizänderung in e bedingte Änderung des Unterschiedswertes D-A (in e) und des Unterschiedswertes $\boldsymbol{D}$-$\boldsymbol{A}$ (in $\boldsymbol{e}$) in beiden Elementen aus einem mit dem Reizzuwuchs in e proportionalen Zuwuchs zu diesem Unterschiedswerte besteht.

Denn in e ist sowohl der Zuwuchs zu δr als auch der Zuwuchs zu i proportional zum Zuwuchs von r, und in $\boldsymbol{e}$ ist zwar $\boldsymbol{r}$ unverändert geblieben, aber der Zuwuchs zu $\boldsymbol{i}$ proportional zum Reizzuwuchs in e. Dass der i-Zuwuchs in e das entgegengesetzte Vorzeichen hat wie der r-Zuwuchs, der $\boldsymbol{i}$-Zuwuchs in $\boldsymbol{e}$ aber das gleiche, ändert nichts daran, dass in beiden Elementen die Zu-

wüchse zu den Unterschiedswerten der Dissimilation und Assimilation dem in e eingetretenen Reizzuwuchs proportional sind.

Das für ein solches nur gedachtes zweigliederiges System geltende Gesetz der Proportionalität zwischen allen Zuwüchsen (den Reizzuwüchsen, den Induktzuwüchsen und den Zuwüchsen des Unterschiedswertes D-A) ist auch für die gegenseitige induktive Wechselwirkung jedes beliebigen Elementenpaares in einem vielgliederigen System gültig, nur tritt in jedem Elemente an die Stelle des Einzelinduktes das Gesamtindukt J (vgl. § 39). Auch jetzt sind die durch den Reizzuwuchs eines Elementes in allen Elementen des Systems bedingten Zuwüchse zum Unterschiedswerte D-A jenem Reizzuwuchs proportional, und wenn in einer beliebig großen Gruppe von Elementen die sämtlichen Reizwerte durch eine Veränderung der Beleuchtung in gleichem Verhältnisse vergrößert oder verkleinert werden, so ist sowohl in ihnen selbst als in allen übrigen Elementen der Zuwuchs zum Unterschiedswerte D-A jedes Elementes mit jenen (unter sich proportionalen) Reizzuwüchsen ebenfalls proportional.

Es fragt sich nun, welche Helligkeitsänderungen den soeben besprochenen Zustandsänderungen des vielgliederigen Systems entsprechen.

Beim gewöhnlichen Sehen im beleuchteten Raume sind, wie schon auf S. 179 erwähnt wurde, fast immer alle Elemente der Sehsubstanz unterwertig, und ich will deshalb auch hier wieder von den selteneren Fällen der Überwertigkeit einzelner Teile der Sehsubstanz absehen. Das endogene Gesamtindukt (J_0) jedes Elementes ist bei allgemeiner Unterwertigkeit der Sehsubstanz ein Hellindukt und also negativ, dagegen ist das durch die Belichtung bedingte exogene Gesamtindukt (J_r) ein Dunkelindukt und daher positiv.

Bei Bestimmung der Dissimilationsgröße eines Elementes gilt die Gleichung

$$D = \delta - J_0 + \delta r - J_r$$

also ist hier das endogene Gesamtindukt J_0 zum Werte von δ hinzuzufügen, um den Wert von D_0 zu erhalten; das exogene Gesamtindukt J_r aber ist vom Werte δr in Abzug zu bringen (vgl. § 39, S. 169).

Die einem Elemente der belichteten Netzhaut entsprechende Helligkeit ergibt sich, wie in § 39 gezeigt wurde, aus der Gleichung

$$H = \frac{D_0 + \delta r - J_r}{2 + \delta r} \qquad (6)$$

Würde die von uns angenommene Verstärkung der Beleuchtung nicht bloß auf einem Teile, sondern auf der ganzen Netzhaut stattfinden, so würde, wie in § 39 dargelegt wurde, der Wert von J_r proportional mit r wachsen, immer also derselbe Bruchteil der Größe δr bleiben. Wenn jedoch die Verstärkung der Beleuchtung nur einen Teil der Netzhaut betrifft, so wächst J_r in jedem zu diesem Netzhautteile gehörigen

Elemente e nicht mehr proportional mit δr, sondern weniger, entsprechend der kleineren Anzahl der von der Reizvergrößerung betroffenen und positiv induzierend auf e wirkenden Elemente der Sehsubstanz. Für die obige Gleichung bedeutet dies eine Verkleinerung von J_r und also eine Vergrößerung für den Zähler des Bruches, welcher die Helligkeit H ausdrückt. Die dem Elemente e entsprechende Helligkeit wird also jetzt größer sein, als sie sein würde, wenn die Beleuchtung nicht bloß für den fraglichen Teil, sondern für die ganze Netzhaut in gleichem Maße verstärkt worden wäre.

Wie in § 39 gezeigt wurde, kann eine und dieselbe Verstärkung der Gesamtbeleuchtung der Netzhaut je nach der Verteilung der Lichtstärken im Netzhautbilde bald eine größere, bald eine kleinere Zunahme der einem Elemente der Sehsubstanz entsprechenden Helligkeit, bald sogar eine Abnahme dieser Helligkeit bedingen. Würde im gegebenen Falle eine Verstärkung der Beleuchtung der ganzen Netzhaut für das von uns in Betracht gezogene Element e eine Helligkeitsabnahme bedingen, so würde also bei der gleichen, aber nur auf einen Teil der Netzhaut beschränkten Verstärkung der Beleuchtung diese Helligkeitsabnahme vermindert oder auch in eine Helligkeitszunahme verwandelt sein können. Der Vollständigkeit halber möge dies hier mit erwähnt sein, obwohl ich im Folgenden von solchen Fällen absehen werde.

Wenn die Veränderung der Beleuchtung eines Teiles der Netzhaut nicht, wie wir soeben annahmen, in einer Verstärkung, sondern in einer Verminderung besteht, so ergibt eine ganz analoge Erwägung wie die oben durchgeführte, dass für jedes, dem jetzt schwächer beleuchteten Netzhautteile zugehörige Element die korrelative Helligkeit kleiner ist, als sie sein würde, wenn die Beleuchtung der ganzen Netzhaut in demselben Maße vermindert worden wäre.

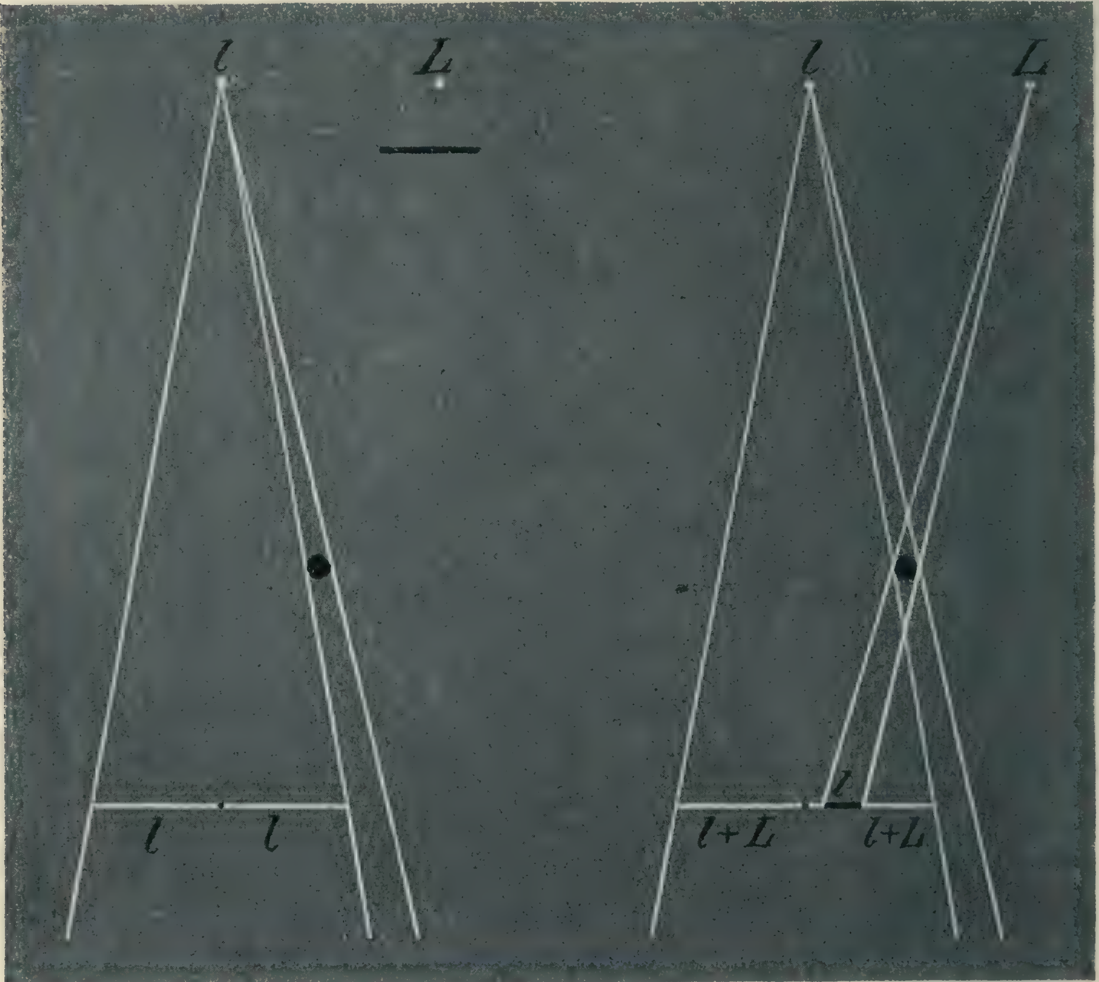
Es bleibt übrig, die Helligkeitsänderungen in einem Elemente ε der Sehsubstanz zu besprechen, welches zu dem unverändert belichteten Netzhautteile gehört. Für ein solches bleibt der Reizwert r ungeändert, während der Wert von J_r sich ändert. Denn wenn in den, zum verändert belichteten Netzhautteile gehörigen Elementen der Reizwert und die Dissimilation einen z. B. positiven Zuwuchs erhielt, so empfängt ε von jedem dieser Elemente einen mit jenem Zuwuchs proportionalen positiven Induktzuwuchs und das summarische Indukt in ε wird größer. Dies bedeutet in obiger Gleichung (6) eine Vergrößerung des Wertes von J_r, also für den Zähler des die Helligkeit ausdrückenden Bruches eine Verkleinerung und daher eine Abnahme der Helligkeit oder eine Verdunkelung. War der Belichtungszuwuchs kein positiver, sondern ein negativer, so tritt, wie ohne weiteres ersichtlich ist, an die Stelle der Verminderung eine Steigerung der Helligkeit.

Somit ergibt sich der allgemeine Satz, dass unter sonst konstanten Bedingungen eine nur einen Teil der Netzhaut betreffende Steigerung bezw. Minderung der Beleuchtung nicht nur im ent-

sprechenden Teile des psychischen Sehfeldes eine gesteigerte bezw. geminderte Helligkeit, sondern zugleich auch im übrigen Sehfelde eine entgegengesetzte Helligkeitsänderung bedingt.

Eine ganze Reihe früher besprochener Tatsachen bestätigen die Gültigkeit dieses aus unserer Kontrasttheorie abgeleiteten Satzes. Denn bei allen in § 31 beschriebenen Fällen von reinem Simultankontrast handelte es

Fig. 44. Fig. 45.



sich um deutliche Helligkeitsänderungen, welche auf einer Papierfläche von unveränderter Lichtstärke lediglich dadurch herbeigeführt wurden, dass auf einem angrenzenden oder auch einem das erste Feld umschließenden Felde (dem Umfelde) die Lichtstärke geändert wurde. Das einfachste Beispiel einer solchen Helligkeitsänderung durch bloße Induktion liefert der folgende Versuch, dessen Beschreibung ich den in § 31 mitgeteilten Versuchen noch anreihen will, weil bei demselben außer den beiden Helligkeitsänderungen, auf die es allein ankommt, keine anderweiten auffälligen und die Aufmerksamkeit des Beobachters ablenkenden Änderungen im Sehfelde stattfinden,

und weil er den im folgenden Paragraphen zu besprechenden Versuchen zugrunde liegt.

Ein kleiner weißer, vor einem möglichst lichtschwachen Hintergrunde stehender Papierschirm (Fig. 44) sei von der Lichtquelle l beleuchtet. Vor einer zweiten Lichtquelle L befinde sich ein schwarzes Schirmchen, welches die Strahlen dieser Lichtquelle von dem weißen Schirme abhält. Eine auf der Mitte des letzteren angebrachte schwarze Marke dient als Fixirpunkt. Zieht man das schwarze Schirmchen zur Seite, so wirft ein senkrechter mattschwarzer Stab seine Schatten neben der Marke auf den weißen Schirm. Obgleich dabei die Lichtstärke der Schattenstelle nicht vermindert wird, und nur auf der übrigen Schirmfläche zum Lichte von l das von L hinzukommt, sieht man doch die Schattenstelle deutlich dunkler werden, um so mehr, je stärker die Lichtquelle L ist.

Da der von der Lichtquelle l bedingte Schatten des Stabes nicht auf den weißen Schirm, sondern in die schon an und für sich dunkel erscheinende Umgebung fällt, so ist der von der Lichtquelle L bedingte Schattten das einzige auf dem Schirme überhaupt Unterscheidbare. Dadurch ist dieser Versuch dem im § 31, S. 132 beschriebenen Fechner'schen Versuche überlegen, bei dem noch ein zweiter Schatten von anderer Helligkeit auf dem Schirme erscheint und die Aufmerksamkeit zersplittert.

§ 49. Ableitung des Ergebnisses der messenden Versuche von Hess und Pretori aus der Theorie der Induktion. Genügend große Verschiedenheit der beiden Lichtquellen vorausgesetzt, sind bei dem zuletzt beschriebenen Versuche die durch die Induktion bedingten Helligkeitsänderungen so groß, dass sie Jedem auffallen. Wenn aber kleinere Verschiedenheiten der beiden Lichtquellen und entsprechend kleinere Reizzuwüchse für die bezüglichen Elemente der Sehsubstanz gegeben sind, so kann es unmöglich werden zu entscheiden, ob nur der eine Teil der Schirmfläche seine Helligkeit ändert oder wirklich beide eine Helligkeitsänderung erfahren. Könnte man in solchen Fällen in möglichster Nähe des Versuchsfeldes, als welches hier der weiße Schirm diente, ein Vergleichsfeld herstellen, welches vor Eintritt der Belichtungsänderung dieselbe Helligkeit zeigte, wie der nur durch die Induktion in seiner Helligkeit veränderte Teil des Versuchsfeldes, und welches auch nach der Belichtungsänderung des letzteren seine Helligkeit völlig unverändert beibehielte, so könnte in zweifelhaften Fällen die Vergleichung mit dieser konstanten Helligkeit uns den gewünschten Aufschluss geben.

Von vornherein ist die Herstellung eines solchen Vergleichsfeldes nur denkbar, wenn dasselbe soweit vom Versuchsfelde abliegt, dass der funktionelle Abstand (vgl. § 38) der beiden Felder groß genug ist, um die induktiven Wechselwirkungen zwischen beiden auf ein zu vernachlässigendes Minimum herabzumindern. Ein großer Abstand der beiden Felder verbietet

sich aber deshalb, weil die Vergleichung zweier Farbenfelder mit zunehmendem gegenseitigen Abstand immer ungenauer wird. Es gilt also denselben so zu wählen, dass einerseits der Fehler bei der Vergleichung, anderseits die aus der induktiven Wechselwirkung sich ergebenden Fehler gegenüber der Größe der zu beobachtenden Helligkeitsänderungen, wenn auch nicht verschwinden, so doch nur wenig in Betracht kommen.

Ein solches Vergleichsfeld benutzten Hess und Pretori bei ihren messenden Versuchen, deren Ergebnisse ein besonders wichtiger Prüfstein für die Richtigkeit der oben entwickelten Induktionsgesetze sind. Das Versuchsfeld lag exzentrisch, und das Vergleichsfeld an der symmetrischen Stelle der anderen Gesichtsfeldhälfte. Das in der Mitte des Versuchsfeldes befindliche Infeld konnte unabhängig vom Umfelde durch eine besondere Lichtquelle messbar beleuchtet werden, und in analoger Weise auch das Umfeld, wie dies alles in § 29 beschrieben wurde.

Wir denken uns zunächst das retinale Infeld und Umfeld gleich stark belichtet, so dass sie zusammen einen gleichmäßig belichteten Bezirk ausmachen. Wird nun der Beleuchtung des Umfeldes unter sonst gleichbleibenden Umständen ein positiver Lichtzuwuchs erteilt, so erhält, wie aus dem im vorigen Paragraphen entwickelten Satze folgt, in allen, den retinalen Elementen des Infeldes zugeordneten Elementen der Sehsubstanz das schon zuvor bestandene Dunkelindukt einen zum Lichtzuwuchs des retinalen Umfeldes proportionalen positiven Zuwuchs, was für das psychische Infeld eine Verdunkelung bedeutet. Soll nun das psychische Infeld trotz der verstärkten Belichtung des retinalen Umfeldes seine frühere Helligkeit behalten, so müsste man auch dem retinalen Infelde einen Lichtzuwuchs erteilen und zwar einen solchen, welcher eben hinreicht, die durch den Reizzuwuchs im Umfelde bedingte Helligkeitsabnahme des psychischen Infeldes durch den Reizzuwuchs im somatischen Infelde zu kompensieren.

Aus dem eben erwähnten Satze, nach welchem die durch einen positiven oder negativen Reizzuwuchs eines Elementes der Sehsubstanz in allen übrigen Elementen bedingten Zuwüchse zum Indukte und zum Unterschiedswerte D-A dem Reizzuwuchse proportional sind, folgt ohne weiteres, dass auch der zur Konstanterhaltung der Helligkeit des psychischen Infeldes nötige Reizzuwuchs dem Reizzuwuchse des Umfeldes proportional sein muss. Denn ebenso wie die durch letzteren im somatischen Infelde induzierte Änderung dem Reizzuwuchs proportional wäre, müsste auch die durch den Reizzuwuchs des Infeldes selbst bedingte entgegengesetzte Änderung diesem Reizzuwuchs proportional sein.

Der Voraussetzung eines stabilen Gesichtsfeldes (s. S. 171) war bei den Versuchen von Hess und Pretori durchaus genügt; ebenso war der Forderung eines konstanten somatischen Sehfeldes soweit möglich dadurch entsprochen, dass die Augen durch längere Pausen zwischen den einzelnen

Versuchen immer wieder auf denselben Anpassungszustand gebracht wurden. Änderungen der Pupille sollten zwar eigentlich ausgeschlossen sein, werden aber keinen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse gehabt haben, weil sie auf alle Teile des gesamten Netzhautbildes in gleichem Verhältnisse wirken, und also das Verhältnis zwischen dem Beleuchtungszuwuchse des retinalen Infeldes und dem des retinalen Umfeldes nicht beeinflussen können.

Die aus den zahlreichen Versuchsreihen von Hess und Pretori gewonnenen Mittelwerte ergaben, dass der zur Konstanz der Helligkeit des Infeldes nötige Beleuchtungszuwuchs dem jeweiligen positiven oder negativen Beleuchtungszuwuchs des Umfeldes stets angenähert proportional war, gleichviel welche (unter den gegebenen Bedingungen mögliche) Lichtstärke dem Infelde vor Beginn einer Versuchsreihe gegeben worden war. Für jede dieser Lichtstärken war also der Koeffizient, welcher dem Beleuchtungszuwuchs des Umfeldes zu geben war, um den eben nötigen Beleuchtungszuwuchs des Infeldes auszudrücken, ein konstanter, wenn auch für die verschiedenen Anfangslichtstärken des Infeldes verschiedener. Je größer die letztere und also auch die Helligkeit des Infeldes war, desto größer war der Koeffizient, den ich in § 29 und 30 als den Kontrastkoeffizient bezeichnet habe. —

Ehe ich die in diesem Abschnitte enthaltenen Grundzüge einer Theorie der Wechselwirkung der Sehfeldstellen abschließe, sei es mir gestattet, einige Sätze aus einer im Jahre 1874 von mir veröffentlichten Mitteilung »zur Lehre vom Lichtsinn« (IV, § 24) hier zu wiederholen, um damit nicht nur der immer wiederkehrenden Vermengung der auf Induktion beruhenden Kontrasterscheinungen mit gewissen ganz andersartigen Erscheinungen zu begegnen (vgl. § 4), sondern auch die Antwort auf eine im dritten Bande der 3. Auflage des Handbuchs der physiologischen Optik von Helmholtz (S. 490) enthaltene irrtümliche Darstellung meines Kampfes gegen die Kontrasttheorie dieses Forschers zu geben. Am angegebenen Orte schrieb ich:

»Wenn auf einen Teil eines weissen Papiers ein Schatten fällt, so nennen wir den beschatteten Teil nicht grau, sondern dunkler, obwohl das Licht, welches er aussendet, genau dieselbe Intensität und Zusammensetzung haben kann, wie das von einem grauen Papiere ausgehende; und wenn wir auf ein graues Papier mittels eines spiegelnden Körpers reflektiertes Licht fallen lassen, so nennen wir die hellere Stelle des Papiers nicht weiß, sondern nur heller, obwohl sie vielleicht genau dasselbe Licht giebt wie ein daneben liegendes weisses Papier. Der Verschiedenheit der Bezeichnung entspricht hierbei eine Verschiedenheit der Wahrnehmung. Das Dunkel, welches im Grau gesehen wird, ist mit dem gleichzeitig darin enthaltenen Weiss vollständig zu einer Empfindung besonderer Qualität verschmolzen; das Dunkel aber, welches als Schatten auf dem Weiß erscheint, wird als

ein besonderes, über dem Weiß liegendes Etwas aufgefasst, durch welches hindurch wir noch das Weiß zu sehen meinen. Analog verhält es sich mit einem auf grauem Papier mittels eines Spiegels erzeugten helleren Flecke, insofern hier das Helle, welches zu dem schon vorhandenen Grau hinzukommt, mit diesem nicht zu einem helleren Grau oder zu Weiß verschmilzt, sondern gesondert als blosses Licht aufgefasst wird, welches dem Grau äußerlich aufliegt, und unter welchem wir noch das Grau zu sehen meinen.«

»Wenn ich mich eben dahin aussprach, dass dasselbe objektive Licht je nach den Nebenumständen bald als eine Eigenschaft (Farbe) der Außendinge, bald aber als Licht oder Dunkel (Schatten, Finsternis) wahrgenommen werden könne, so wollte ich damit nicht gesagt haben, dass trotz dieser verschiedenen Wahrnehmung doch die ‚Empfindung‘, entsprechend der Gleichheit des Reizes, in beiden Fällen dieselbe sei. Vielmehr meine ich, dass die ‚Empfindung‘ in beiden Fällen wesentlich verschieden ist, was trotz gleichem Reize deshalb möglich ist, weil die Lichtempfindung nicht bloss eine Funktion des Reizes und der jeweiligen Beschaffenheit der zunächst getroffenen nervösen Teile ist, sondern auch mit abhängt von der Beschaffenheit der zum Sehakt in Beziehung stehenden Hirnteile, in welchen die optischen Erfahrungen des ganzen Lebens gleichsam organisiert enthalten sind. Wie der Klang, welchen ein Klavier gibt, wenn man eine Taste desselben anschlägt, nicht bloß abhängt von den Schwingungen der Saiten, welche der Schlag direkt trifft, sondern auch von der Resonanz des ganzen Instrumentes, was bei aufgehobener Dämpfung am offenbarsten, aber auch sonst immer der Fall ist, so ist auch die Empfindung, welche ein äußerer Reiz in uns erweckt, nicht bloß abhängig von der Nervenfaser, welche zunächst vom Reize getroffen wird, sondern ist zugleich das Ergebnis der Resonanz unseres ganzen Sensoriums. Ein scheinbar unbedeutender Nebenumstand hebt gleichsam den Dämpfer von gewissen Saiten ab und läßt sie mit anklingen, so daß der Charakter der Empfindung ein wesentlich anderer wird.«

»Es ist richtig, daß diese große Resonanzfähigkeit unseres Gehirns die Untersuchung der Beziehungen zwischen Reiz und Empfindung außerordentlich erschwert, und wir vermögen uns nur dadurch einigermaßen zu helfen, daß wir unter den möglichst einfachen Bedingungen beobachten und nur solche Empfindungen vergleichen, welche unter annähernd gleichen Bedingungen gewonnen wurden.«[1])

---

1) Als Herausgeber des III. Bandes der 3. Aufl. des Handbuches der physiol. Optik von Helmholtz sagt v. Kries (S. 490): »Es muss hier zur Vermeidung von Missverständnissen und zur Klärung der literarischen Sachlage hinzugefügt werden, dass der Hauptgegner der Helmholtz'schen Kontrasttheorie, Hering, in späterer Zeit selbst auf diese Verhältnisse, sogar mit besonderem Nachdrucke hingewiesen

VIII. Abschnitt.

Die binokularen tonfreien Farben.

§ 50. Binokulare Mischung tonfreier Farben. Wir können die Gesamtheit der wirklichen Dinge, die sich im gegebenen Augenblicke auf der Netzhaut des rechten oder des linken Auges abbilden, als das rechtsäugige oder das linksäugige Gesichtsfeld (vgl. § 7, S. 21) bezeichnen. Diese beiden Gesichtsfelder bilden das jeweilige Gesamtgesichtsfeld derart, dass der größere Mittelteil desselben beiden gemeinsam ist, und dass sich an dieses binokulare Gebiet nach rechts wie nach links ein kleineres, nur je einem Auge sichtbares Gebiet anschließt.

Analogerweise haben wir im psychischen Gesamtsehfelde ein größeres binokulares Mittelgebiet und die beiden unokularen Seitengebiete zu unterscheiden. Jeder Stelle des Mittelgebietes entspricht sowohl im rechtsäugigen als im linksäugigen somatischen Sehfelde je eine Stelle, und jede

---

hat. So hat er insbesondere den eigentümlichen Umschlag geschildert (Hermann's Handbuch der Physiologie. III, S. 574. Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn in Graefe-Saemisch's Handbuch der Augenheilkunde. Kap. XII, S. 8), der stattfindet, wenn eine (objektiv) dunklere Stelle in hellerer Umgebung zunächst als Fleck, dann aber, etwa zufolge einer Verschiebung, als ein auf die Fläche fallender Schatten gesehen wird, also zuerst den Eindruck eines mit der Umgebung gleichbeleuchteten Grau, dann den eines (beschatteten) Weiss macht. Hering hat, wie es scheint, nicht bemerkt oder sich darüber getäuscht, dass die Thatsachen, die er hier mit vollem Recht als beachtenswert betont, eben diejenigen sind, die Helmholtz seiner Kontrasttheorie zugrunde legte, und deren Anerkennung uns nötigt, diese Theorie in großem Umfange als eine mindestens mögliche anzuerkennen, und dass sie der früher von Hering geführten Bekämpfung dieser Theorie, die in der Behauptung gipfelte, dass sie schwarz in weiss verkehre, den Boden entziehen. Lehren doch eben die hier von Hering herangezogenen Thatsachen, dass wirklich ohne Änderung der Empfindung der zwingende Eindruck des Grau in den des Weiss umschlagen kann.«

In Wirklichkeit ist »die literarische Sachlage« die, dass ich schon im Jahre 1874 in meinen Mitteilungen zur Lehre vom Lichtsinn, in denen ich das erste Mal gegen die Kontrasttheorie von Helmholtz auftrat, die von v. Kries erwähnten Tatsachen ausführlich besprochen habe und in den von v. Kries zitierten Handbüchern (1879 und 1905) nur darauf zurückgekommen bin. Dies hat v. Kries übersehen.

Helmholtz hat übrigens diese Tatsachen gar nicht mit erwähnt. Er hätte sie als Beleg für die Richtigkeit seiner Bemerkung anführen können, daß wir immer »die Neigung haben zu trennen, was in der Farbe oder dem Aussehen eines Körpers von der Beleuchtung und was von der Eigentümlichkeit des Körpers selbst herrührt.« Aus dieser Neigung suchte er allerdings eine gewisse Gruppe von Erscheinungen des Simultankontrastes, aber keineswegs alle zu erklären. Denn eine andere Gruppe wollte er darauf zurückführen, »daß wir geneigt sind, diejenigen Unterschiede, welche in der Anschauung deutlich und sicher wahrzunehmen sind, für größer zu halten als solche, welche entweder in der Anschauung nur unsicher heraustreten, oder mit Hülfe der Erinnerung beurteilt werden müssen« (1. S. 392), noch andere darauf, daß »der Begriff des Weiß dabei verändert wird« (1. S. 396).

zwei solche, zu einer und derselben Stelle des psychischen Sehfeldes korrelative Stellen der beiden somatischen Sehfelder heissen nach Fechner korrespondierende oder auch, wie ich sie genannt habe, Deckstellen, während Johannes Müller sie als identische Stellen bezeichnete.

Hiernach ist die an einer Stelle des binokularen Mittelgebietes, kurz des Deckgebietes erscheinende Farbe von beiden zugehörigen somatischen Sehfeldstellen zugleich abhängig, und es fragt sich nun, welche Regeln oder Gesetze für diese zweifache Abhängigkeit gelten.

Auch bei völliger Verfinsterung beider Augen geht in der Sehsubstanz des somatischen Doppelsehfeldes der Stoffwechsel weiter, dessen psychisches Korrelat jetzt die endogenen Farben des Sehfeldes sind. Wir sehen diese im allgemeinen tonfreien Eigenfarben des Auges, so oft wir auf sie achten, sei es, dass allerlei Gestaltungen, wie z. B. Nachbilder oder andere endogene Farbengebilde unsere Aufmerksamkeit auf sich gezogen haben, oder dass wir absichtlich den Inhalt des Sehfeldes zum Gegenstande unserer Aufmerksamkeit machen. Wer die Augen geschlossen hat, achtet gewöhnlich gar nicht auf diese Erscheinungen, auch dann nicht, wenn noch Licht durch die Lider hindurch zur Netzhaut gelangt. Befindet er sich jedoch offenen Auges in einem völlig verfinsterten Raume und schaut sich absichtlich in demselben um, so bemerkt er jetzt erst, wie Vieles trotz völliger Unsichtbarkeit der Außendinge sein Sehfeld enthalten kann.

Wer sehen will, hat also immer Gelegenheit etwas zu sehen, mögen seine Netzhäute belichtet oder verfinstert sein. Wer aber seine Augen schließt, will gewöhnlich gar nicht sehen und macht daher auch keine Erfahrungen über die Eigenfarben seines Sehfeldes; denn wir sehen nur das, was unabsichtlich oder vorbedachterweise Gegenstand unserer Aufmerksamkeit wird; für alles Übrige sind wir »seelenblind«.

Was wir bei völlig verfinsterten Augen im binokularen Teile des psychischen Gesamtsehfeldes sehen, ist also ebenso wie im beleuchteten Raume von beiden somatischen Sehfeldern zugleich abhängig, ohne dass wir zu sagen vermögen, inwieweit es vom einen oder anderen bedingt ist. Wenn in diesem Gebiete aus dem grauen Nebel desselben irgendwo ein hellerer oder dunklerer Fleck auftaucht, so kann derselbe seine Ursache ebensowohl nur in einem der beiden somatischen Sehfelder als in beiden zugleich haben. Würde sich aus der Form des Fleckes ergeben, dass er das Nachbild eines nur dem linken Auge sichtbar gewesenen Außendinges ist, so könnten wir freilich schließen, dass er im wesentlichen dem linken somatischen Sehfelde entstammt, doch bliebe dabei immer noch unentschieden, inwieweit an der Farbe des Fleckes die korrespondierende Stelle des rechten somatischen Sehfeldes mitbeteiligt ist.

Die Betonung der auch bei völliger Verfinsterung des Auges in seinem somatischen Sehfelde ablaufenden Vorgänge ist hier deshalb geboten, weil die Ansicht verbreitet ist, dass man durch Verfinsterung des einen Auges oder gar durch blossen Schluss seiner Lider dasselbe völlig vom Sehakte ausschließen könne und es deshalb bei allen Beobachtungen mit dem anderen irgendwie be-

lichteten Auge gar nicht weiter zu berücksichtigen brauche. Es wird sich später zeigen, zu welchen Irrungen dies führen kann.

Nach dem oben Gesagten entspricht jeder Farbe des Deckgebietes als physisches Korrelat eine, von beiden unokularen somatischen Sehfeldern bedingte Regung, jeder Farbe eines unokularen Seitengebietes aber eine, nur von einem dieser Sehfelder bedingte Regung. Im ersteren Falle lässt sich die korrelative Farbe kurz als eine binokulare, im letzteren Falle als eine unokulare Farbe bezeichnen.

Wir wollen einmal annehmen, es könne unter gewissen Umständen an einer Stelle des Deckgebietes nur eine der beiden unokularen Regungen, aus denen sich eine binokulare Farbe zu ergeben pflegt, für die an dieser Stelle des psychischen Sehfeldes erscheinende Farbe bestimmend sein, so dass der Anteil, den das andere Auge an der Entstehung der binokularen Farbe hätte, jetzt gleich Null wäre. Solchenfalls würden auch im Deckgebiete außer den binokularen solche nur unokular bedingte Farben erscheinen können.

Die im folgenden zu beschreibenden Versuche werden zeigen, dass im Deckgebiete solche Farben, wenn auch nicht völlig unbeeinflusst vom jeweiligen Zustande der Deckstelle des anderen Auges, thatsächlich vorkommen. Im allgemeinen aber wird sich ergeben, dass, wenn die in beiden Augen stattfindenden Regungen nicht beiderseits dieselben sind, an der zugehörigen Stelle des psychischen Sehraumes eine binokulare Farbe erscheint, die keiner von jenen beiden Farben gleich ist, welche einer rein unokularen Regung entsprechen würde; dass ferner diese neue Farbe in der tonfreien Farbenreihe (vgl. § 9) stets zwischen den beiden genannten Farben gelegen ist, aber je nach den Umständen bald der einen, bald der anderen näher steht.

Jede solche durch binokulare Regung entstandene Farbe lässt sich im Anschlusse an den althergebrachten Begriff der binokularen Farbenmischung als ein Gemisch aus zwei, im eben erörterten Sinne unokularen Farben auffassen, wobei der Fall, dass nur eine der beiden Farben im Deckgebiete des Sehraumes wahrgenommen würde, als einer der beiden Grenzfälle zu gelten hätte, in welchen der Anteil der einen Farbe am Gemisch auf ein Minimum herabgemindert ist. Denn jede im Deckgebiete erscheinende, zweien Deckpunkten der Netzhäute entsprechende Farbe ist eine einheitliche, d. h. wir nehmen entweder nur die eine von beiden oder eine in der tonfreien Farbenreihe zwischen beiden liegende Farbe wahr, nie aber zugleich die beiden unokularen Farben, aus denen wir uns die jeweilige binokulare gemischt denken können. Nur nacheinander können wir im Falle eines sogenannten Wettstreites bald die eine, bald die andere, bald irgend eine der möglichen Zwischenfarben an derselben Stelle wahrnehmen.

Indem ich im folgenden die binokularen tonfreien Farben als Gemische zweier unokularer tonfreier Farben auffasse, will ich nichts erklärt, sondern zunächst nur einen zusammenfassenden Ausdruck für die große Mannigfaltigkeit der bezüglichen Tatsachen gewonnen haben.

Sind die beiden unokularen Farben von gleicher Qualität, so kann aus ihrer Mischung nur wieder ein Gemisch von eben derselben Qualität entstehen. Denn wir können uns, wie in § 10, S. 35 auseinandergesetzt wurde, schon jede tonfreie Farbe selbst als ein Gemisch aus zwei elementaren Sehqualitäten, dem absoluten Weiss (W) und absoluten Schwarz (S) denken und jedes dieser Gemische durch ein bestimmtes Verhältnis der Menge (dem Gewichte) des darin enthaltenen Weiss zur Menge des Schwarz ausdrücken. Dieses Verhältnis bestimmt dann die Qualität der Farbe. Jedes solche Gemisch aber lässt sich wieder mit einem beliebigen anderen gemischt denken. Ist nun in beiden Gemischen das Verhältnis $W:S$ dasselbe, so muss dieses Verhältnis in dem aus ihrer Mischung entstandenen Gemische auch wieder dasselbe sein, gleichgültig, welchen relativen Anteil an letzterem jedes der beiden Einzelgemische hat.

Würde es sich statt der Gemische aus W und S z. B. um Gemische aus absolutem Alkohol und reinem Wasser handeln, so versteht sich ohne weiteres, dass sich aus einer Vermischung einer beliebigen Menge von 20 prozentigem Spiritus aus der einen Flasche mit einer beliebigen Menge von 20 prozentigem Spiritus aus einer anderen Flasche nur immer wieder 20 prozentiger Spiritus ergeben kann. Der Leser wolle die Trivialität dieses Beispieles im Hinblick auf das Folgende entschuldigen.

Nach der üblichen Auffassung kommen nämlich für die Entstehung einer tonfreien binokularen Lichtempfindung nur die beiden, dem Weiss entsprechenden »Erregungsgrößen« und die von letzteren abhängigen »Intensitäten« der beiden Empfindungen des Weissen in Betracht, während die von mir mit S bezeichneten Werte gar nicht mit in Rechnung gebracht werden. Denn wenngleich die herrschende Lehre das Schwarz als eine »Empfindung« gelten lässt[1]), so doch nur als eine der Ruhe des Sehorganes entsprechende Empfindung, welche, wenn die Ruhe eine absolute wäre, als eine Lichtempfindung von der Intensität Null anzusehen wäre. So sagte z. B. Fechner, Schwarz sei »nur ein geringerer Grad des Weiss«, wobei er unter Schwarz die Empfindung und nicht etwa eine sehr kleine Lichtenergie verstand.

Auf Grund dieser Lehre konnte man daran denken, dass beim Binokularsehen durch »Summierung« oder »Superposition« der beiderseitigen Erregungen eine Lichtempfindung von größerer »Intensität«, will sagen Helligkeit, entstehen könne, als unter sonst gleichen Umständen bei nur einäugigem Sehen.

---

1) A. Fick wollte freilich das Schwarz folgerichtigerweise nicht als »Empfindung«, sondern nur als »Vorstellung« gelten lassen. Doch Farbe ist für mich Farbe, möge sie Inhalt einer »Empfindung«, einer »Vorstellung« oder einer »Wahrnehmung« sein, ebenso wie der Marmor für mich Marmor ist, möge er noch als Bruchstein im Steinbruche oder als Pflasterstein auf der Straße liegen, möge die Mauer eines Gebäudes oder das Kunstwerk eines Bildhauers aus ihm geformt sein.

Während sich aus der binokularen Mischung zweier qualitativ gleicher Farben immer wieder dieselbe Farbe ergeben muss, können aus der Mischung ungleicher Farben je nach dem relativen Anteil, den jede derselben an der binokularen Farbe hat, verschiedene Farben entstehen, jedoch nur solche, welche in der Reihe der tonfreien Farben zwischen den beiden unokularen liegen. Die binokulare Farbe muss also stets minder hell (dunkler) sein als die hellere unokulare, und heller (minder dunkel) als die dunklere unokulare Farbe. Würde der Anteil der einen unokularen Farbe verschwindend klein sein, so wäre dies, wie gesagt, nur ein Grenzfall[1]).

Betrachten wir nämlich die beiden unokularen Farben wieder als Gemische aus W und S und denken uns diese zwei Gemische untereinander gemischt, so ist leicht ersichtlich, dass daraus ein neues Gemisch entstehen muss, in dem das Verhältnis $W:S$ ein anderes ist, als in jeder der beiden zur Mischung verwendeten Farben. Je nach dem Mengenverhältnis, in dem die letzteren sich gemischt haben, wird das neu entstandene Gemisch ein anderes sein, aber sein relativer Gehalt an Weiss, d. i. seine Weisslichkeit oder Helligkeit wird stets kleiner sein als in der weisslicheren und größer als in der minder weisslichen unokularen Farbe, und analog wird es sich mit der Schwärzlichkeit verhalten.

Dies alles ganz ebenso, wie man zwei Spiritussorten, deren jede einem anderen Mischungsverhältnis zwischen reinem Alkohol und reinem Wasser entspricht, wieder unter sich mischen kann, woraus dann, je nach dem Mischungsverhältnis der beiden Sorten, neue Sorten entstehen, die jedoch sämtlich wässeriger und minder alkoholisch sind als die alkoholreichere, dagegen minder wässerig und alkoholischer als die alkoholärmere der gemischten Sorten.

Eine eingehende Untersuchung der binokularen Farbenmischung ist zwar von großem Interesse und gewährt vielversprechende Einblicke in die Art des psychischen Betriebes, durch welchen unser binokulares Sehfeld aus Einzelteilen der beiden unokularen sich aufbaut, doch muss ich mich auf die Vorführung verhältnismäßig weniger grundlegender Versuche und Beobachtungen beschränken. Ich möchte hier nur an der Hand der Tatsachen den Beweis führen, dass im binokularen psychischen Sehfelde je zweien Deckstellen der beiden somatischen Sehfelder in jedem Augenblicke immer nur eine Farbe entspricht, und dass diese Farbe nie heller als die hellere und nie dunkler als die dunklere der beiden unokularen Farben ist, aus denen man sich die binokularen gemischt denken kann; dass also eine »Summierung« oder »Superponierung« zweier Helligkeiten beim Binokularsehen nie vorkommt.

---

1) Drückt man den relativen Anteil, welchen je eine der beiden unokularen Farben an ihrem binokularen Gemisch hat, durch je einen echten Bruch aus, so ist die Summe dieser beiden Brüche stets gleich 1. Dem entspricht der seinerzeit von mir aufgestellte »Satz vom komplementären Anteil« der beiden Augen an der binokularen Farbe.

Unter »binokularer Farbenmischung« versteht die herrschende Lehre nur die binokulare Vereinigung zweier Farben von verschiedener bunter Qualität, z. B. Rot und Blau. Eine binokulare Mischung tonfreier Farben giebt es für diese Lehre nicht, weil sie alle diese Farben von derselben Qualität sein lässt und nur eine etwaige »Summierung« oder »Superponierung« zweier »farbloser Empfindungsintensitäten« bezw. eine gegenseitige Hemmung zweier »Erregungen« in Betracht zieht. Sobald man die verschiedenen tonfreien Farben als verschiedene Qualitäten gelten lässt, verlieren gewisse Erklärungen, welche für einen Teil der hierher gehörigen Erscheinungen versucht worden sind, ihre theoretische Grundlage. Betreffs dieser Erklärungen möge hier insbesondere auf die Darlegungen von Johannes Müller (23), Panum (33), Fechner (34), Aubert (6) und Helmholtz (1) verwiesen werden, welche schon wegen der dabei beschriebenen Thatsachen wertvoll sind. Letzteres gilt ganz besonders von der ausgezeichneten Abhandlung Panum's »über das Sehen mit zwei Augen«.

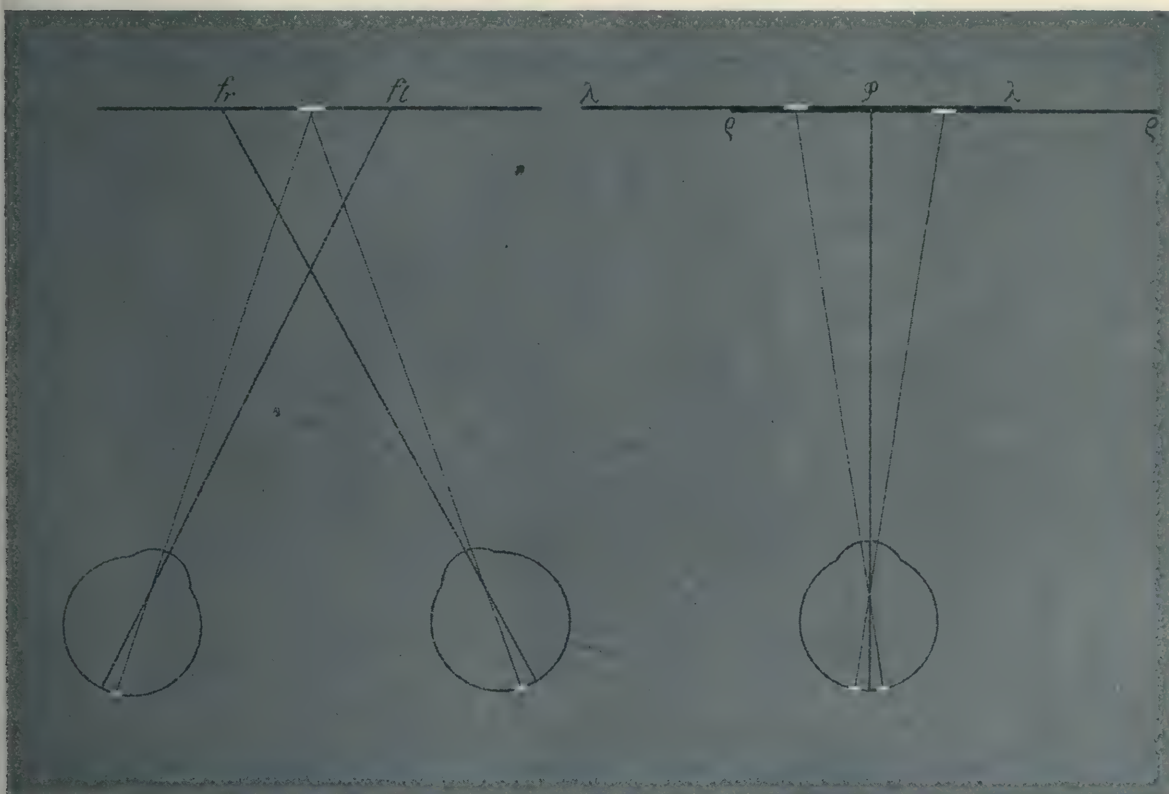
Die binokularen tonfreien Farben sind als solche einer besonderen Untersuchung bisher nicht unterworfen worden. Es ist sogar, z. B. von Helmholtz, bestritten worden, dass sich aus einer verschiedenen Belichtung zweier Deckstellen der Doppelnetzhaut überhaupt eine einfache binokulare Farbe ergeben könne; vielmehr werde je nach den Umständen bald nur die der einen, bald die der anderen Belichtung entsprechende Farbe gesehen. Um so angemessener schien es, die tonfreien binokularen Farben hier besonders zu behandeln. Die spätere Besprechung der binokularen Mischung bunter Farben wird weitere Belege für die hier aufgestellten Sätze bringen und zugleich Gelegenheit geben, auch den sogenannten binokularen Farbenkontrast zu untersuchen.

§ 51. Binokulare Mischung tonfreier Farben beim Doppeltsehen eines kleinen Feldes auf andersfarbigem Grunde. Befindet sich auf einer im übrigen ganz gleichartigen und durchaus matten Fläche z. B. einem auf dem Tische liegenden schwarzen Papier ein kleines ebenfalls mattes Feld von anderer z. B. weisser Farbe, und bringt man durch schwaches Schielen seine Gesichtslinien vor oder hinter dem Papier zur Durchkreuzung, so erhält man ersteren Falles ein sogenanntes gleichseitiges andernfalls ein ungleichseitiges Doppelbild des kleinen Feldes.

Fig. 46 A veranschaulicht den Fall, wo die beiden, durch dickere Linien (*fr* und *fl*) dargestellten Gesichtslinien sich vor der Ebene durchkreuzen, in welcher eine kleine weisse Scheibe auf schwarzem Grunde zu sehen ist. Gemäß dem von mir seinerzeit ausführlich begründeten Gesetze der identischen Sehrichtungen findet man die Richtungen, in denen uns die beiden Bilder des Doppelbildes der weissen Scheibe erscheinen, wenn man erstens die beiden Netzhäute mit ihren jeweiligen Bildern so ineinandergelegt denkt, dass jede zwei korrespondierende Netzhautstellen

zusammenfallen[1]), und zweitens ein, diese Doppelnetzhaut enthaltendes einfaches Auge annimmt, welches unter gewöhnlichen Umständen zwischen den beiden wirklichen Augen zu liegen hätte. Die zu den Netzhautbildern dieses imaginären »Cyklopenauges«, wie es später HELMHOLTZ nannte, gehörigen Richtungslinien versinnlichen dann die Sehrichtungslinien, auf denen uns die, den jeweils vorhandenen Netzhautbildern entsprechenden Dinge erscheinen, wie dies Fig. 46 B für den vorliegenden Fall darstellt. Der Sehpunkt φ dieser Figur entspricht den beiden Punkten *fr* und *fl* des wirklichen Papieres (Fig. 46 A), welches uns auf Grund von Erfahrungsmotiven

A Fig. 46. B



angenähert in seiner wirklichen Entfernung auf dem Tische erscheint, obwohl sich unsere Gesichtslinien schon vor demselben durchschneiden. Die beiden sich zum größeren Teile deckenden unokularen Bilder des schwarzen Papieres mit der weissen Scheibe sind in Fig. 46 B nicht ineinander, sondern übereinander gelegt, und das des linken Auges mit λλ, das des rechten mit ρρ bezeichnet.

In analoger Weise ist der Fall, in welchem sich die Gesichtslinien hinter dem schwarzen Papier kreuzen, durch Fig. 47 A und B veranschau-

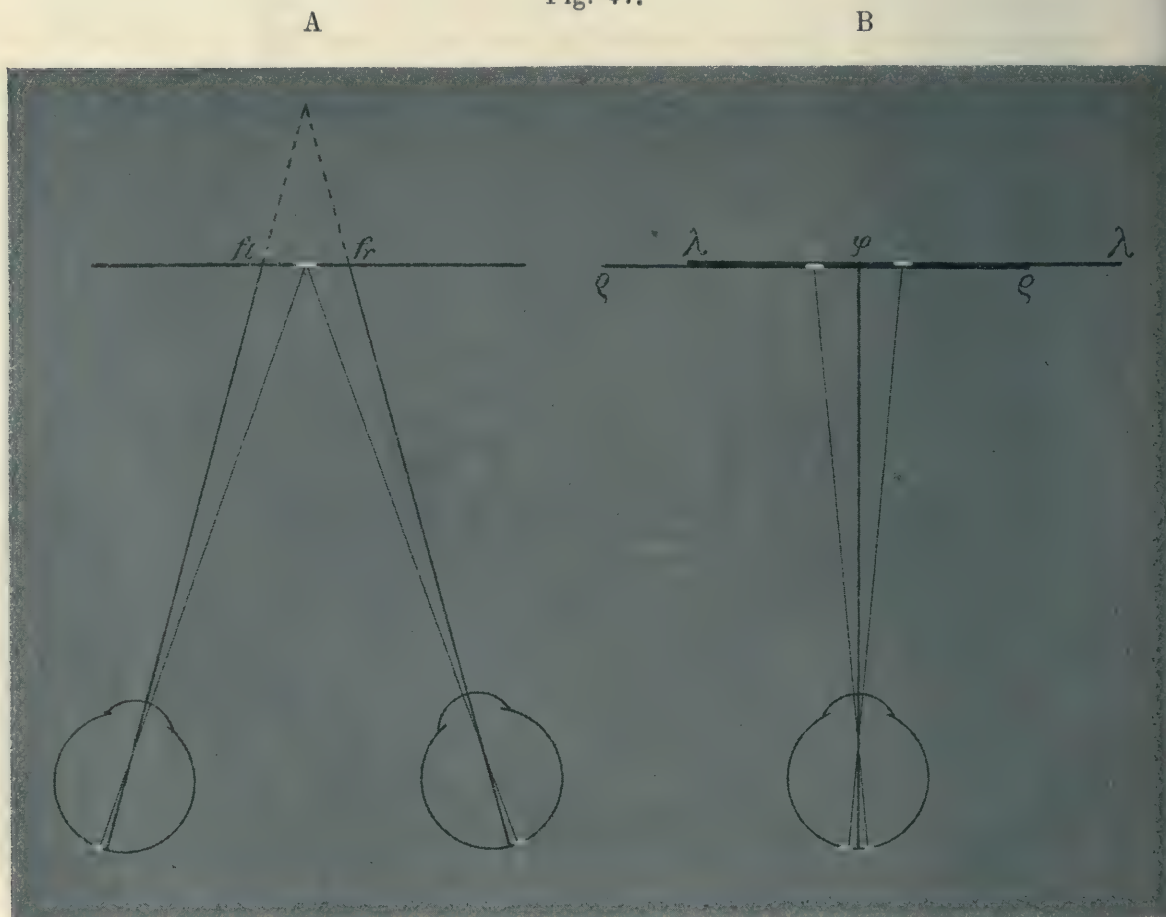
1) Von der geringen Inkongruenz der Anordnung der Deckstellen auf den beiden Netzhäuten ist dabei abgesehen.

licht. Auch hierbei erscheint uns das Papier beiläufig in seiner wirklichen Entfernung, obwohl der Kreuzungspunkt der Gesichtslinien in größerer Entfernung liegt als das Papier.

An der Stelle jedes Scheibenbildes kommen zwei verschiedene unokulare Farben zur Deckung, nämlich die von der stärkeren Strahlung der kleinen weissen Papierstelle einerseits und die von der schwachen Strahlung des schwarzen Papiers anderseits an korrespondierenden Stellen der beiden Sehfelder bedingte Farbe. Gleichwohl scheint uns bei diesem Versuche die

Fig. 47.

A B

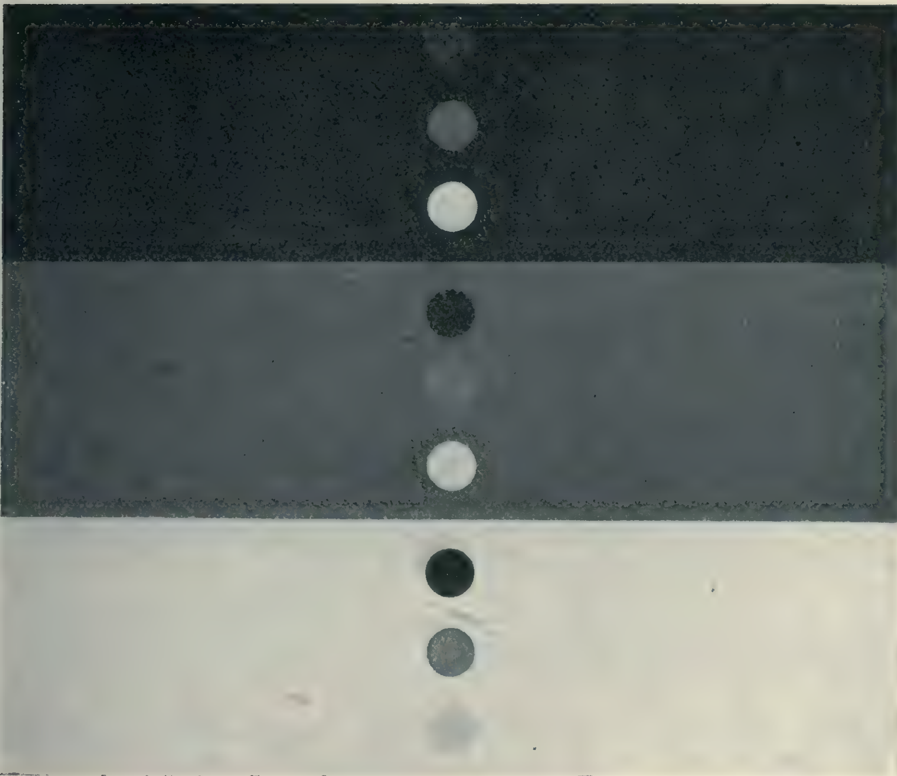


Farbe der beiden Doppelbilder keine andere zu sein, als die, welche uns die weisse Papierstelle bei binokularem Einfachsehen derselben zeigt, wobei je zwei korrespondierende Stellen der beiden Netzhäute von der gleichen Strahlung getroffen werden.

Ist, wie wir eben annahmen, das kleine doppelt gesehene Feld weiss auf schwarzem Grunde, so könnte man sich die weisse Farbe seines doppelten Bildes daraus erklären wollen, dass die eine der beiden Deckstellen nur das geringfügige Licht des schwarzen Grundes empfängt, dessen schwache Wirkung sich gegenüber der viel stärkeren der weissen Bildstelle im anderen

Auge nicht geltend machen könne. Diese Auffassung wird aber sofort hinfällig, wenn man ein kleines schwarzes Feld auf weissem Grunde zum Versuche benutzt; denn dann erscheinen beim Schielen die beiden Bilder schwarz, obwohl die eine Deckstelle von dem schwachen Lichte des kleinen schwarzen Feldes, die andere von dem relativ starken Lichte des weissen Grundes bestrahlt ist. Das Schwarz der kleinen Scheibe vermag also hier das Weiss der korrespondierenden Stelle des Grundes ganz ebenso aus dem Felde zu schlagen, wie im vorigen Falle das Weiss der kleinen Scheibe das Schwarz des Grundes.

Fig. 48.



Die Größe des Unterschiedes zwischen Scheibe und Grund spielt bei den Versuchen keine wesentliche Rolle; denn mag die Lichtstärke der kleinen Scheibe viel oder wenig von der des Grundes abweichen, immer scheint uns zunächst das Doppelbild dieselbe Farbe zu haben wie die mit beiden Augen einfach gesehene Scheibe. Es kommt nur darauf an, dass die Scheibe nicht zu gross ist und sich deutlich genug vom Grunde unterscheidet, und dass der letztere ganz homogen ist und nicht etwa an der bezüglichen Stelle ebenfalls etwas Unterscheidbares enthält. Auch auf die Form des Feldes kommt es nicht an, wenn es nur zureichend klein oder bei gestreckter Form zureichend schmal ist.

Fig. 48 zeigt eine Reihe kleiner Kreisfelder auf schwarzem, auf weissem und auf grauem Grunde. Betrachtet man eines der Felder in gewöhnlicher Weise einen Augenblick und kreuzt unmittelbar nachher die Gesichtslinien etwas vor oder hinter der Fläche des Papiers, so bemerkt man, vorausgesetzt, dass beide somatischen Sehfelder und besonders die betroffenen Stellen derselben sich in ganz gleichem Zustande befinden, keinen deutlichen Unterschied zwischen der Farbe der jetzt erscheinenden zwei Felder und der des unmittelbar vorher einfach gesehenen kleinen Feldes.

Der Helligkeitsunterschied zwischen Feld und Grund mag noch so klein sein, stets bedingt er, wenn er nur noch deutlich wahrnehmbar ist, beim Schielen ein erkennbares Doppelbild. Es genügt, ein mattes weisses oder schwarzes Papier mit einer etwas angestaubten Fingerspitze zu berühren, um den entstandenen Fleck auch im Doppelbilde wahrzunehmen.

Wer seine Augen nicht genügend in der Gewalt hat, um sich ein Doppelbild mit beliebigem Abstand seiner beiden Einzelbilder zu erzeugen, halte eine lange, in der Medianebene des Kopfes befindliche Nadel in passendem Abstande vor das kleine Feld und fixiere statt des letzteren die Nadel. Wenn er dieselbe unter fortwährender Fixierung vom Papiere entfernt oder demselben nähert, kann er den beiden Einzelbildern des Doppelbildes einen beliebigen gegenseitigen Abstand geben.

Falls die beiden Netzhautstellen, welche das Bild des kleinen Feldes empfangen, sich infolge vorausgegangener ungleicher Bestrahlung nicht in ganz gleichem Zustande befinden, so können die beiden Bilder des Doppelbildes verschieden erscheinen. Dasselbe könnte auch bei einer beiderseits ungleich starken Bestrahlung der immer etwas durchscheinenden Sklera der Fall sein. Von dem abnormen Falle einer habituellen Verschiedenheit der beiden Augen kann hier abgesehen werden. Um Nachwirkungen einer vorausgegangenen ungleichen Bestrahlung der beiden Netzhäute auszuschließen, hält man ein größeres graues Blatt genügend lange Zeit vor die Versuchsfläche, welches man erst unmittelbar vor jedem Versuche wegzieht.

Der Grund, auf dem das kleine Feld liegt, soll ganz eben und von durchaus homogener Farbe sein, darf also auch kein unterscheidbares Korn zeigen. Benutzt man kleine Papierscheiben, so sollen sie aus dünnem, ebenfalls ganz ebenen Papier sein und dem Grunde ganz dicht anliegen.

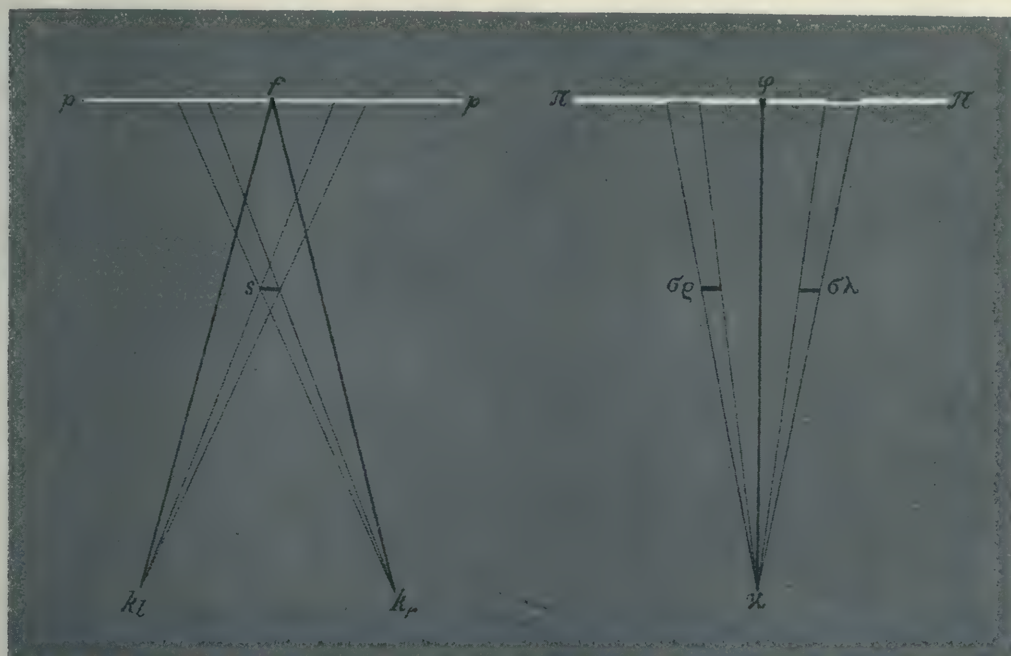
Bei dem beschriebenen Versuch erscheinen die Doppelbilder in der Ebene des Papiers; anders kann es sich verhalten, wenn das kleine Feld, welches doppelt gesehen werden soll, sich nicht in jener Ebene, sondern in passendem Abstande vor derselben befindet, während man eine, auf der im übrigen ganz homogenen Papierfläche angebrachte Marke binokular fixiert. Auf diese Weise kann man ein ungleichseitiges (gekreuztes) Doppelbild erhalten, welches, besonders im ersten Augenblick, nicht in der Ebene des Papiers, sondern ebenso vor derselben erscheinen kann, wie das kleine Feld in Wirklichkeit vor dem Papier liegt.

Es bedeute *pp* in Fig. 49 A den Durchschnitt eines auf dem Tische liegenden weissen Papiers, *f* eine binokular fixierte Marke auf demselben

und *s* eine kleine schwarze Scheibe, deren Fläche zu der des weissen Papiers parallel ist. Man bringt die Scheibe mittels einer feinen Pincette median zwischen Gesicht und fixierte Marke. Die Scheibe wird dann samt der Pincette doppelt gesehen, und das Doppelbild $\sigma\varrho$ und $\sigma\lambda$ kann dabei in beiläufig derselben Entfernung über dem Tische erscheinen, in der sich die wirkliche Scheibe über demselben befindet, wie dies Fig. 49 B veranschaulicht.

Da man bei Akkommodation der Augen für die Entfernung des fixierten Punktes die nähere doppelt erscheinende Scheibe nicht scharf sehen kann, empfiehlt es sich, ihren Abstand von der Papierfläche nicht größer zu nehmen, als nötig ist.

A Fig. 49. B

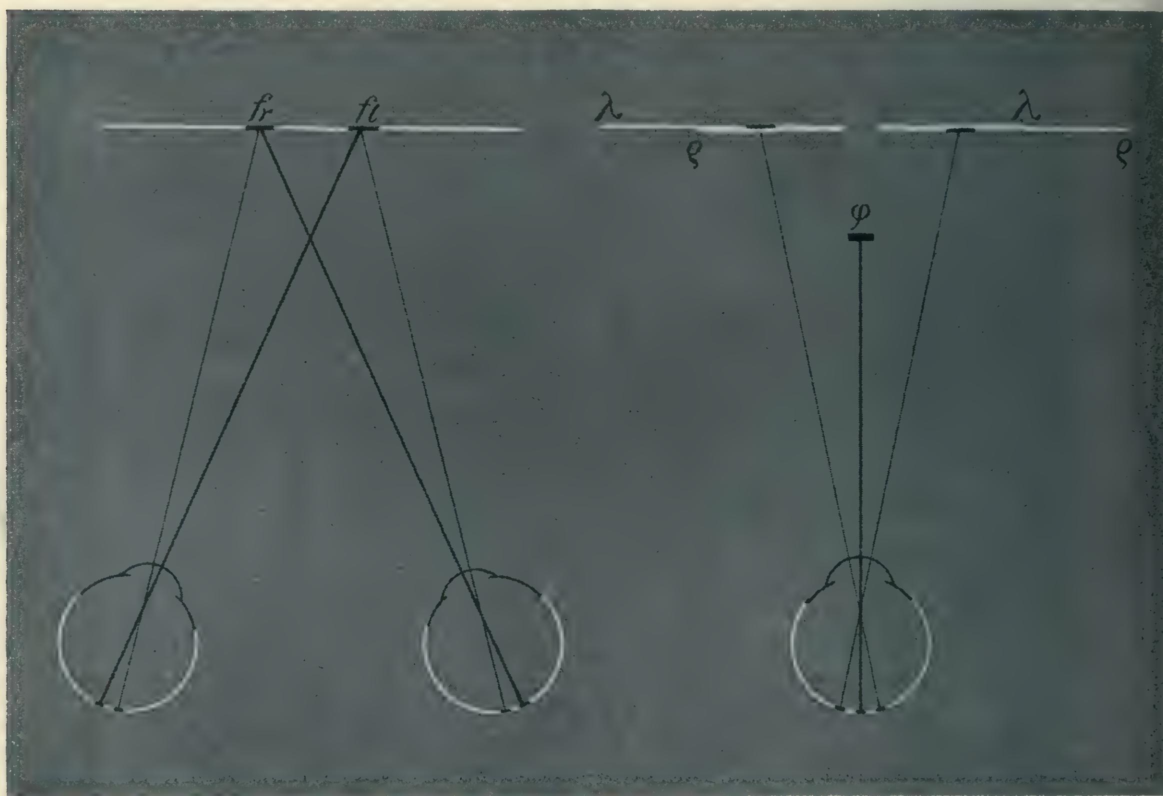


Auch bei dieser Versuchsanordnung entspricht der Netzhautstelle, welche im einen Auge ein Bild der kleinen schwarzen Scheibe empfängt, als korrespondierende im anderen Auge eine vom Lichte des weißen Papiers getroffene Stelle. Wenn nun die beiden Bilder der schwarzen Scheibe nicht in der Ebene des weißen Papiers, sondern vor derselben erscheinen, so wäre jetzt Gelegenheit gegeben, die beiden unokularen Farben gesondert an zwei verschiedenen Stellen des Sehraumes zu sehen, nämlich die schwarze Farbe vor der Papierfläche und die weiße in dieser selbst, also an den Orten, wo sie sozusagen hingehören. In Wirklichkeit aber erhält man den Eindruck, als verdecke jedes der beiden schwarzen Scheibenbilder eine entsprechende Stelle des weißen Grundes und mache dieselbe unsichtbar, obwohl sie sich doch auf der einen Netzhaut ebenso abbildet,

wie der schwarze Grund auf der anderen. Der einfachen Sehrichtung der beiden verschieden beleuchteten Netzhautstellen entspricht also auch nur eine Farbe.

Von den eben beschriebenen Versuchen erhält man den Eindruck, als ob dabei eine Mischung der beiden unokularen Farben gar nicht stattfinde, sondern die eine die andere völlig ausschließe. Es ist aber zu bedenken, dass bei diesen Versuchen die Vergleichung der Farbe des zuvor binokular einfach gesehenen kleinen Feldes mit der seines nachherigen Doppelbildes

A Fig. 50. B



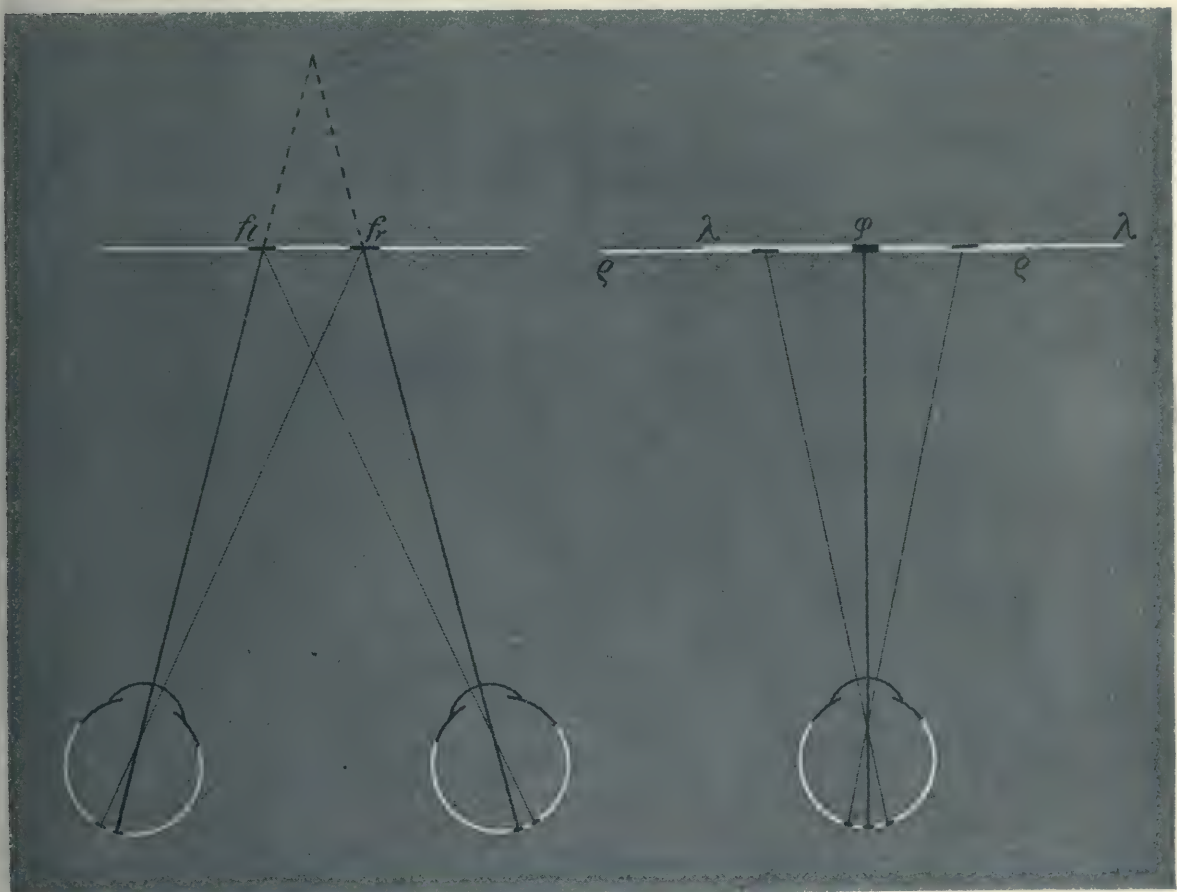
nur eine sukzessive ist, und dass solche Sukzessivvergleichungen unzuverlässig sind. Es gilt also, die Versuche so abzuändern, dass eine Simultanvergleichung der beiden Farben möglich wird.

Zu diesem Zwecke bringt man statt eines einzigen, zwei in Form und Farbe ganz gleiche kleine Felder auf dem helleren oder dunkleren homogenen Grund an und kreuzt seine Gesichtslinien vor oder hinter der Papierfläche dermaßen, daß sich auf je einer von zwei korrespondierenden Netzhautstellen je eines der beiden Felder abbildet, wie dies in Fig. 50 A und Fig. 51 A für den Fall zweier schwarzen Felder auf weißem Grunde dargestellt ist. Es erscheinen dann drei kleine Felder, ein in der Mitte liegendes binokular gesehenes, rechts und links daneben je ein, nur von einem

Auge gesehenes (vgl. Fig. 50 B und Fig. 51 B). Nun lässt sich die Farbe der letzteren mit der Farbe des ersteren vergleichen und zwar um so besser, je näher die beiden seitlichen Bilder dem Mittelbilde sind. In den Figuren sind sie zum Zwecke der Deutlichkeit der eingezeichneten Netzhautbilder viel zu weit auseinander gerückt.

Wenn die Gesichtslinien vor der Papierfläche gekreuzt sind, so kommt es vor, dass das binokulare Mittelbild nicht in, sondern vor dieser Fläche in der Luft schwebend erscheint, wie dies Fig. 50 B veranschaulicht. Dies ändert jedoch nichts an den Farben der Bilder und beeinträchtigt nicht deren Vergleichung.

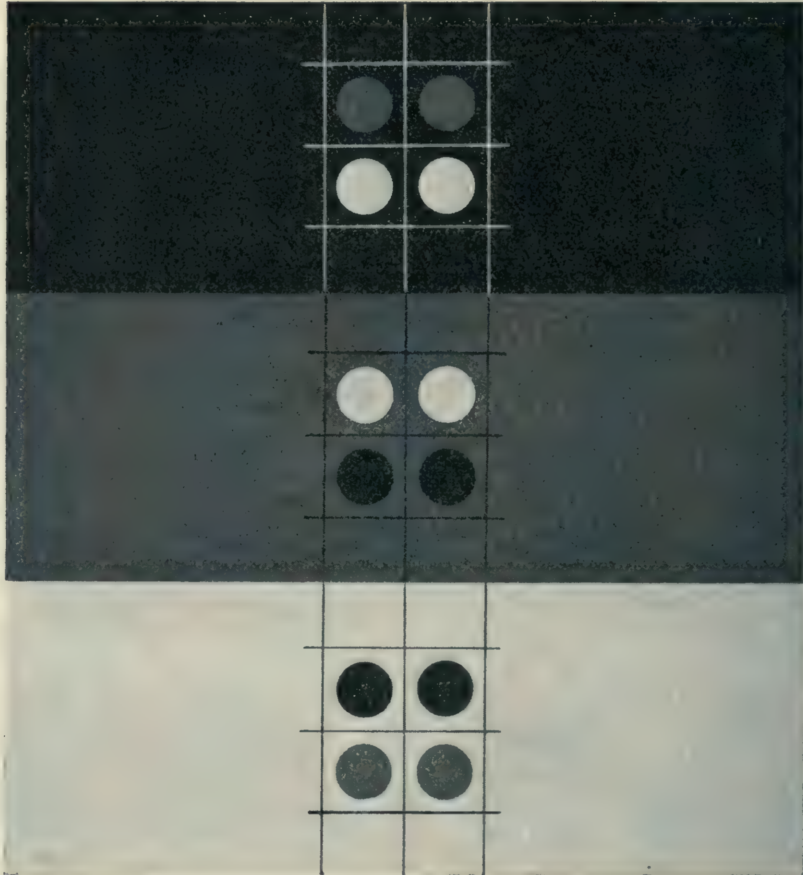
A Fig. 51. B



Es empfiehlt sich für den nicht besonders Geübten, bei diesen Versuchen die kleinen Felder, welche sich auch mit Hilfe eines Locheisens aus geeigneten Papieren ausschlagen und auf den gewählten andersfarbigen Grund aufkleben lassen, in einer Gitterzeichnung anzuordnen, wie dies Fig. 52 zeigt. Hält man die Figur senkrecht zur primären Blickebene, so bleiben die durch binokulare Deckung entstandenen Bilder dann viel sicherer vereinigt, während sie ohne das Gitter leicht wieder in ihre Einzelbilder

zerfallen. Denn je vielgestaltiger die zu verschmelzenden Figuren sind, desto stärker ist der sogenannte Fusionszwang. Mit Hilfe des schon oben (S. 220) erwähnten Kunstgriffes wird dann Jeder durch Kreuzung der Gesichtslinien vor der Papierfläche zwei beliebige von den in Fig. 52 nebeneinander liegenden kleinen Kreisfeldern zu dauernder binokularer Deckung bringen. Dem Geübten wird dies auch durch Kreuzung der Gesichtslinien hinter der Papierfläche leicht gelingen.

Fig. 52.



Man bemerkt bei diesen Versuchen, dass die beiden nur von je einem Auge gesehenen seitlichen Bilder der kleinen Felder doch nicht ganz dieselbe Farbe haben, wie das von beiden Augen gesehene Mittelbild, sondern minder hell sind als letzteres, falls der Grund lichtschwächer, minder dunkel, falls der Grund lichtstärker ist, als die wirklichen kleinen Felder. Dies beweist, dass die Farbe der seitlichen Bilder nicht ganz unabhängig ist von der Farbe der korrespondierenden Stelle des Grundes, dass aber der relative Anteil der letzteren an der Farbe der seitlichen Bilder ein kleiner ist, und zwar wie sich später zeigen wird, um so kleiner, je kleiner der Sehwinkel der Felder (vgl. § 52, S. 229).

Stellt man längere Versuchsreihen an, bei denen man die Lichtstärke des Grundes und der kleinen Felder mannigfach variiert und ebenso mit großen wie mit kleinen Unterschieden dieser Lichtstärken arbeitet, so findet man, dass die Farbe der seitlichen Bilder immer in dem erwähnten Sinne von der Farbe des binokularen Bildes abweicht. Ein ganz ausschließliches Hervortreten der einen unokularen Farbe, wie es unsere früheren Doppelbildversuche zu ergeben schienen, findet also, wenn die Felder nicht allzuklein sind, doch nicht statt.

Übrigens aber entspricht das Ergebnis dem früher ausgesprochenen Satze, dass, wenn aus der binokularen Mischung zweier ungleicher tonfreier unokularer Farben eine dritte Farbe entsteht, dieselbe in der tonfreien Farbenreihe stets zwischen den beiden unokularen Farben liegt.

Der Einfachheit wegen wurde für die beschriebenen Versuche eine symmetrische Konvergenz der Gesichtslinien angenommen; es ist aber daran zu erinnern, dass es nach erfolgter binokularer Vereinigung der beiden bezüglichen kleinen Felder sehr leicht ist, das Doppelauge ohne Änderung des Konvergenzwinkels nach rechts oder links zu wenden und auf diese Weise immer andere einander entsprechende Punkte der beiden Figuren sich auf den Stellen des direkten Sehens abbilden zu lassen, ganz ebenso, wie man bei Betrachtung eines Stereoskopenbildes seinen Blick bald diesem, bald jenem Teile desselben zuwenden kann. Für unseren Versuch erwächst daraus der Vorteil, dass nicht notwendig das binokulare Mittelbild mit den Stellen des direkten Sehens und die seitlichen Bilder mit exzentrischen Netzhautstellen gesehen werden müssen. Die letzteren können bei nicht genügender Anpassung lichtempfänglicher sein als die zentralen Teile, was zugunsten der Helligkeit der seitlichen Bilder wirken kann. Blickt man aber nicht auf das binokulare Mittelbild, sondern auf eine zwischen ihm und einem Seitenbilde gelegene Stelle des Grundes, insbesondere auf die zwischenliegende Gitterlinie, so entsprechen den beiden zu vergleichenden Feldbildern exzentrische Netzhautstellen von gleicher Lichtempfänglichkeit, wie dies der Versuch fordert.

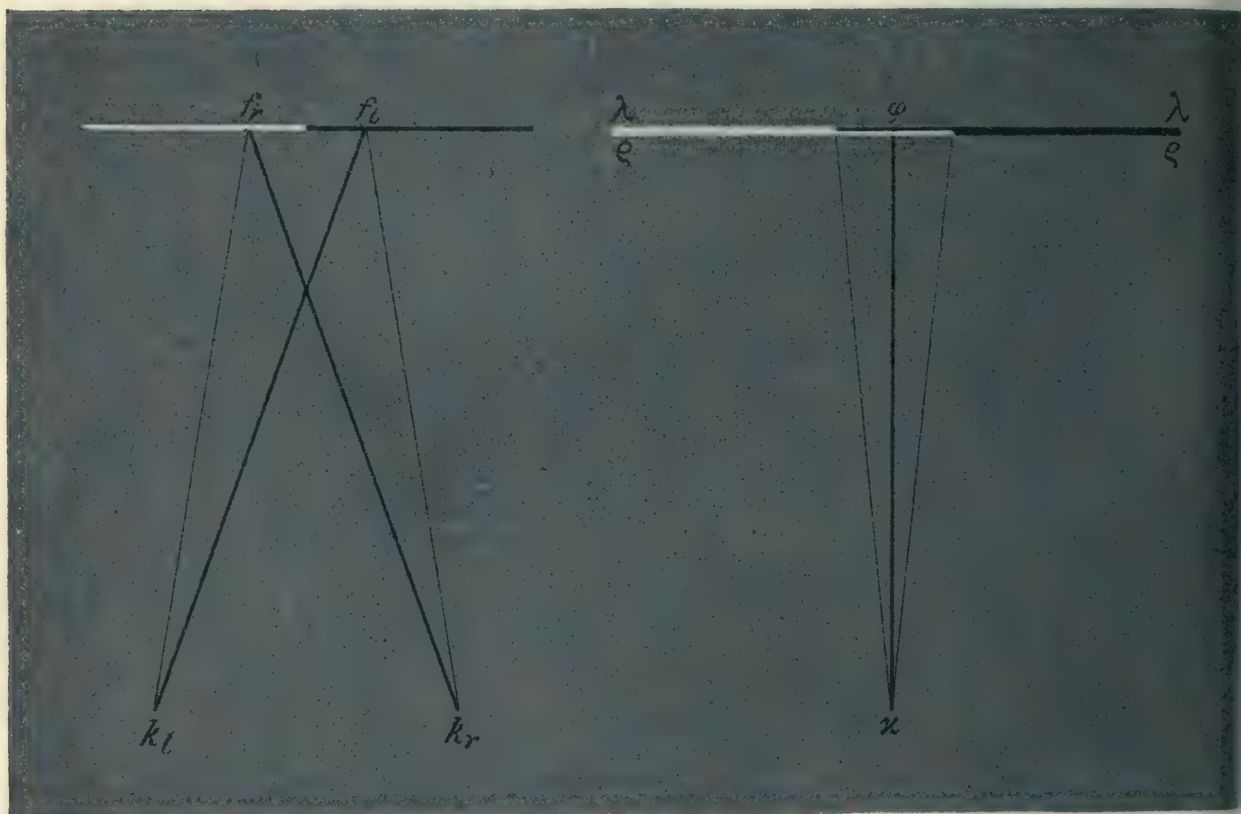
Wie man zu verfahren hat, wenn man bei diesen Versuchen seine Gesichtslinien schon vor dem Sichtbarwerden der zuvor verdeckten kleinen Felder in eine bestimmte Stellung bringen will, ist aus einer in § 53 enthaltenen Beschreibung ersichtlich.

§ 52. **Einfluss der Grenzlinien auf die binokulare Mischung tonfreier Farben.** Hat man eine ausgedehnte ebene Fläche vor sich, deren durchaus homogene linke Hälfte von anderer Lichtstärke ist, als die ebenfalls durchaus homogene rechte, und kreuzt man die Gesichtslinien ebenso wie bei den früheren Versuchen vor oder hinter der Fläche, so erscheint die Grenzlinie doppelt.

In Fig. 53 *A* entsprechen wieder die starken schwarzen Linien den Gesichtslinien, die schwachen jederseits derjenigen Richtungslinie, welche sich mit der Gesichtslinie des anderen Auges auf der halb weißen, halb schwarzen Papierfläche schneidet. Statt der beiden Augendurchschnitte

sind hier nur die beiden Knotenpunkte *kl* und *kr* gezeichnet. Fig. 53 *B* versinnlicht die entsprechenden Sehrichtungen und die sich deckenden unokularen Sehfelder; in der Mitte deckt sich ein Teil der schwarzen Hälfte des linksäugigen Sehfeldes mit einem Teile der weißen Hälfte des rechtsäugigen. Dieser Mittelteil erscheint nicht in einer durchaus gleichen Farbe, sondern von rechts nach links abschattiert, dicht an seiner rechten Grenze am hellsten, dicht an der linken Grenze am dunkelsten und im übrigen in einer von rechts nach links zunehmenden Dunkelheit. Fig. 55 gibt ein

A Fig. 53. B



ungefähres Bild des Eindruckes, den man erhält, wenn man die Gesichtslinien vor oder hinter den in Fig. 54 dargestellten Flächen gekreuzt hat. Das Analoge gilt von Fig. 57 und Fig. 56.

Sind die Lichtstärken der beiden Flächenhälften nicht zu verschieden, so machen die binokularen Farben des Mittelteils ganz ebenso wie die der beiden Seitenteile den Eindruck von sogenannten wirklichen Farben (s. § 4, S. 7) des Papieres. Bei größerer Verschiedenheit erhalte ich vom Mittelteile mehr den Eindruck einer zufällig ungleich belichteten oder teilweise beschatteten Fläche. Auch erscheint er mir öfters beim Anhalten des Blickes als eine konvexe oder konkave Fläche. Halte ich die Augen einige Zeit möglichst ruhig, so mindert sich der anfangs höchst auffallende Unter-

Fig. 54.

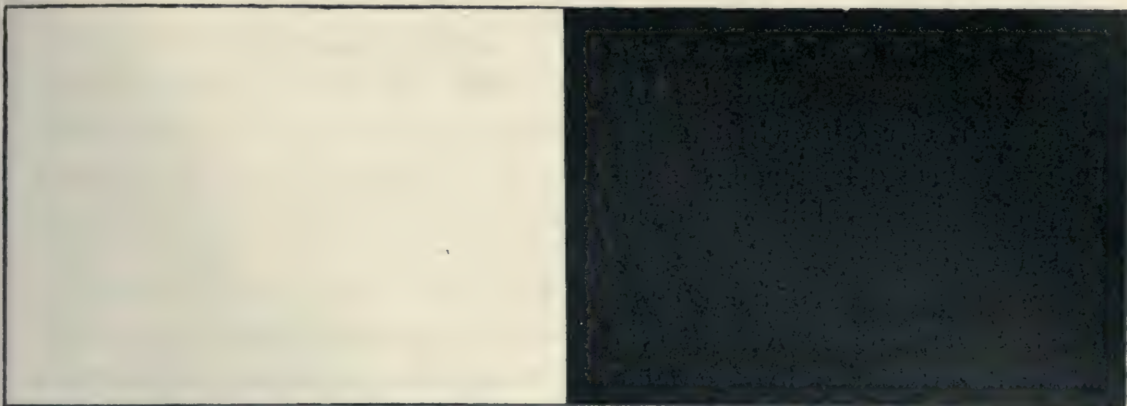


Fig. 55.

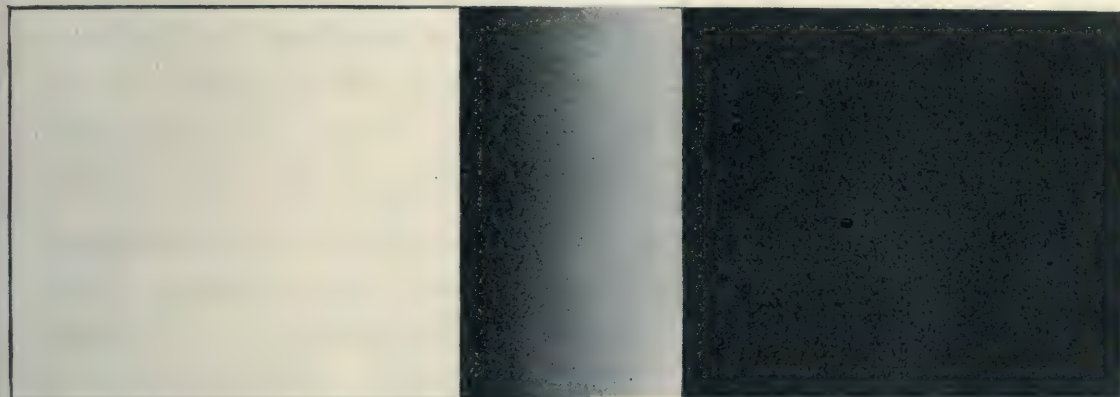


Fig. 56.

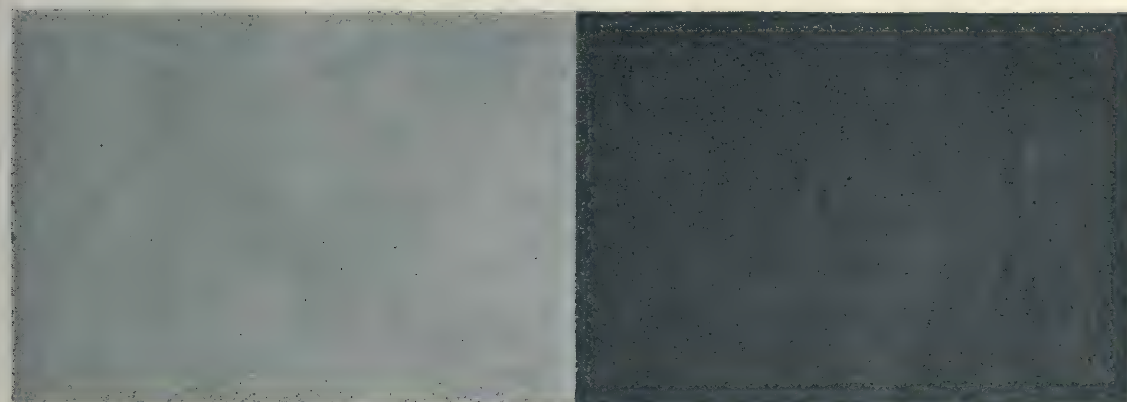
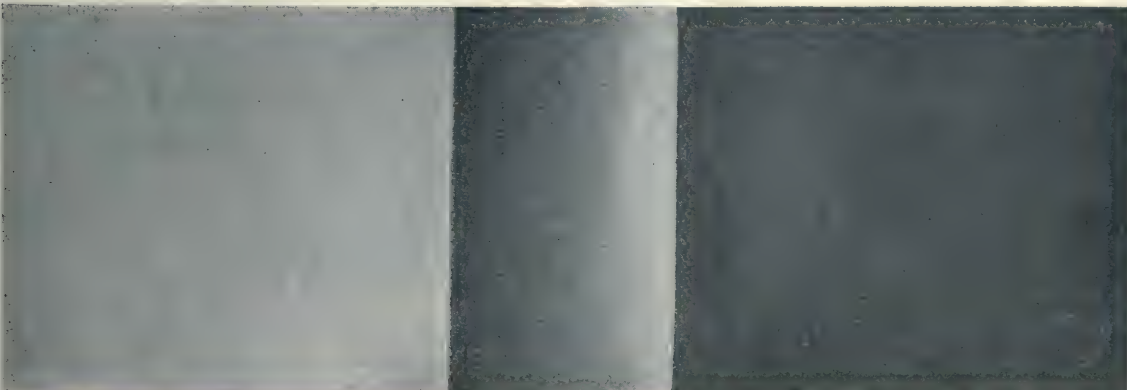


Fig. 57.



schied zwischen den in der Nähe der beiden Grenzlinien erscheinenden Farben des Mittelteils, und der letztere nimmt eine mehr gleichartige graue Farbe an[1]. Gestatte ich den Augen wieder ihre gewohnten Bewegungen, so tritt wieder die nach der einen Grenzlinie hin zunehmende Weißlichkeit, nach der anderen hin zunehmende Schwärzlichkeit auffallender hervor. Sind die Papierflächen nicht ganz homogen gefärbt, oder haben sie sogar kleine Knickungen, so kann der Mittelteil auch wie glänzend erscheinen.

Bei wiederholter Anstellung desselben Versuches ist die Art der Zunahme der Helligkeit in der Nähe der einen, ihre Abnahme in der Nähe der andern Grenzlinie keineswegs immer ganz dieselbe, sondern sie kann bald schroffer bald allmählicher sein; auch können einmal die helleren, ein andermal die dunkleren Zwischenfarben der beiden auf den Seitenteilen erscheinenden Farben im Mittelteile überwiegen; immer aber ist die Farbe, die man an einer beliebigen Stelle des letzteren sieht, eine in der tonfreien Farbenreihe zwischen den beiden unokularen Farben gelegene, nie eine hellere oder eine dunklere.

Ob man die Farben des Mittelteiles als sogenannte wirkliche Körperfarben oder aber nur als zufällige Schattenfarben oder Glanzfarben sieht, ist hier insofern gleichgültig, als auch jede Schattenstelle oder Glanzstelle im einzelnen Augenblick immer nur eine binokular entstandene Helligkeit oder Dunkelheit hat. Solche Eindrücke kann man auch beim Sehen mit nur einem Auge erhalten, und sie sind keine besondere Eigentümlichkeit der binokularen Farbenmischung. Schon in § 4 habe ich auseinandergesetzt, dass man eine Fläche von ungleich verteilter Helligkeit bald als eine an verschiedenen Stellen verschieden gefärbte, bald als eine nur zufällig ungleich belichtete oder beschattete sehen kann. Dies ist beim Sehen mit nur einem Auge ebenso der Fall, wie beim Sehen mit beiden. Den vorhin erwähnten Eindruck der Konvexität oder Konkavität des Mittelteiles der bei unseren Versuchen erscheinenden Fläche kann man ebenfalls mit nur einem Auge erhalten, wenn man eine einseitig beleuchtete, wirklich gekrümmte Fläche oder auch nur ihr Abbild, wie z. B. den Mittelteil der in Fig. 55 und 57 abgebildeten Flächen betrachtet. Ebenso ist der Glanz durchaus nicht ein spezifisch binokulares Phänomen (s. § 54).

Unser Versuch zeigt, welche wichtige Rolle hier die beiden Grenzlinien bei der binokularen Farbenmischung spielen. Nicht nur sind die beiden Grenzlinien das zunächst Auffallende, sondern auch die an eine solche unokulare Grenzlinie unmittelbar angrenzende Farbe der zwischenliegenden Fläche ist der bezüglichen unokularen Farbe so ähnlich, als sei ihr von der

---

1) Bei längerem Stillstande der Augen können infolge unwillkürlicher Schwankungen derselben an den beiden Grenzlinien sehr helle oder dunkle Säume erscheinen, welche die Folge eines Sukzesssivkonstrastes sind und hier nicht zur Sache gehören.

Farbe der Deckstelle des andern Sehfeldes nichts oder äußerst wenig beigemischt, und als könne solche Beimischung sich erst mit wachsendem Abstand von der Grenzlinie mehr und mehr geltend machen.

Überhaupt gilt folgendes: Wenn sich in einem von zwei korrespondierenden unokularen Sehfeldbezirken eine Grenzlinie zweier Farben befindet, während der andere eine durchaus homogene, nichts Unterscheidbares enthaltende Farbe hat, so haben bei der binokularen Mischung die durch die Grenzlinie geschiedenen Farben in der Nähe der letzteren das Übergewicht über die nicht differenzierte Farbe im anderen Sehfelde. Panum bezeichnete dieses Überwiegen der Grenzfarben, wie ich sie nennen will, als das »Dominieren der Konture«.

Wir vermögen bei dem hier beschriebenen Versuche nicht, willkürlich bald den homogenen Inhalt des einen, bald den differenzierten des andern unokularen Sehfeldbezirkes erscheinen zu lassen; stets bleiben beide Bilder der Grenzlinie sichtbar, und stets erscheint die zwischenliegende Fläche nach der einen Grenzlinie hin heller, nach der anderen hin dunkler, als ihr Mittelteil. Diese Thatsache ist besonders gegenüber der Ansicht von Helmholtz hervorzuheben, nach welcher es bei ungleicher Belichtung zweier Deckgebiete von unserer willkürlichen Aufmerksamkeit abhängen soll, ob der Inhalt des einen oder des andern unokularen Sehfeldgebietes überwiegend oder ausschließlich zur Erscheinung kommt (vgl. § 54).

Ganz ähnlich wie mit einer geraden verhält es sich mit jeder beliebig geformten Grenzlinie zweier unokularer Farben, wenn der korrespondierende Bezirk der anderen Netzhaut ganz gleichmäßig belichtet ist. An der Grenzlinie haben im binokularen Sehfelde die Grenzfarben das Uebergewicht über die im korrespondierenden Teile des anderen unokularen Sehfeldes gleichmäßig ausgebreitete Farbe. Dem entspricht es durchaus, wenn, wie im vorhergehenden Paragraphen beschrieben wurde, das Doppelbild eines kleinen Feldes auf lichtschwächerem oder lichtstärkerem Grunde in derselben Farbe erscheint, wie wenn wir es bei binokularer Fixierung einfach sehen. Denken wir uns z. B. die linksgelegene der beiden in Fig. 55 dargestellten unokularen Grenzlinien nach rechts hin kreisförmig umgebogen und also in sich selbst zurücklaufend: wäre die so entstandene, von der Grenzlinie umschlossene Kreisfläche nur klein, so enthielte sie nur die dunkle Grenzfarbe, die sich wegen der Kleinheit des Feldes fast unverändert bis in den Mittelpunkt desselben erstrecken würde. Dies entspricht dem Falle, wo ein lichtschwächeres kleines Feld auf lichtstärkerem Grunde doppelt gesehen wird. Denken wir uns andererseits die rechts gelegene Grenzlinie der Fig. 55 nach links hin kreisförmig umgebogen, so enthält das so entstandene Kreisfeld nur die helle Grenzfarbe, was dem Falle des Doppelsehens eines lichtstärkeren Feldes auf lichtschwächerem Grunde entspricht.

Ist das als Doppelbild erscheinende Kreisfeld zu groß, so dass sein zentraler Teil zu weit von der Grenzlinie abliegt, so kann derselbe deutlich heller bezw. dunkler als die periphere Zone des Feldes erscheinen, wovon man sich überzeugen wird, wenn man den Doppelbildversuch mit größeren Kreisfeldern anstellt, als wie sie in § 51 angenommen waren.

Wäre das kleine Feld nicht kreisförmig, sondern bei gleichem Flächeninhalt elliptisch oder sonst wie in die Länge gezogen, so ist es ganz von

Fig. 58 A.

	M	G	C
N	F	Z	
H	Y		O
	L	U	E

T	M		C
N		Z	D
H		R	O
K	L	U	

Fig. 58 B.

T	M	G	C
N	F	Z	D
H	Y	R	O
K	L	U	E

der Grenzfarbe erfüllt, die in dem kreisförmigen Felde nur dicht an der Peripherie erscheint. Daher besteht zwischen der Farbe eines binokular fixierten Feldes, dessen Lichtstärke von der des umgebenden Grundes verschieden ist, und der Farbe seines Doppelbildes ein um so kleinerer Unterschied, je schmäler das Feld ist. Man kann dies sehen, wenn man abwechselnd größere und kleinere Kreisfelder oder breitere und schmälere Streifen zum Doppelbildversuche benutzt. Schwarze Buchstaben auf weißem

Grunde erscheinen uns daher unokular gesehen schwarz wie die binokular gesehenen.

Bringt man mit Hilfe einer haploskopischen Vorrichtung die beiden Hälften der Fig. 58 A zu binokularer Deckung, so erhält man ein Verschmelzungsbild, wie es Fig. 58 B darstellt. Sämtliche Buchstaben erscheinen schwarz. Gleichwohl werden dabei gewisse Buchstaben nur vom linken, andere nur vom rechten, und nur die übrigen von beiden Augen zugleich gesehen. Mancher vermag gar nicht ohne weiteres zu unterscheiden, welche Buchstaben nur auf einer, und welche auf beiden Netzhäuten zugleich abgebildet sind. Die Gitterlinien erleichtern die Konstanz des passenden Konvergenzwinkels der Gesichtslinien. Wird derselbe willkürlich oder unwillkürlich ein wenig geändert, so zerfallen die binokular gesehenen Buchstaben in Doppelbilder, die übrigen bleiben einfach.

Wer kurzsichtig ist oder sich durch eine Konvexbrille kurzsichtig macht, bedarf zu dem Versuche keiner haploskopischen Vorrichtung; er braucht nur seine Gesichtslinien weit hinter der Figur zu durchkreuzen und dieselbe in den Abstand seines Fernpunktes zu bringen.

§ 53. Binokulare Deckung zweier kleiner Felder von gleicher Form, aber ungleicher Farbe auf beiderseits gleichem Grunde. Bei den bisher beschriebenen Versuchen handelte es sich um binokulare Deckung zweier unokularer Sehfeldbezirke, deren einer aus einer homogenen Farbe bestand, während im anderen dieselbe Farbe ein andersfarbiges Feld umgab oder an ein solches grenzte. Es enthielt also nur der eine unokulare Bezirk etwas Unterscheidbares. Jetzt handelt es sich um binokulare Deckung zweier Bezirke, die beide an korrespondierenden Stellen je ein kleines vom Grunde verschiedenes Feld enthalten. Die Farbe des Grundes ist wieder in beiden unokularen Bezirken die gleiche, aber die Farbe der kongruenten und sich deckenden kleinen Felder ist nicht beiderseits gleich. Infolge der Kleinheit der Felder wirken ihre Farben als Grenzfarben, und auf die Mischung der letzteren kommt es jetzt an.

Um die aus dieser Mischung hervorgehende neue Farbe mit jeder der beiden unokularen vergleichen zu können, kann man sich einer durch Fig. 59 A und Fig. 59 B erläuterten Methode bedienen.

Fig. 59 A zeigt drei Paare kleiner Kreisfelder von gleichem Durchmesser, wie sie sich leicht mittels eines Locheisens aus mattgrauem Papiere herstellen lassen. Das mittle Paar ist dasjenige, um dessen binokulare Vereinigung es sich handelt. Die beiden Felder des obersten Paares sind sowohl unter sich als mit dem rechten Felde des mittlen Paares von gleicher Lichtstärke, dasselbe gilt von den beiden untersten Feldern und dem linken des mittlen Paares. Kreuzt man in entsprechender Weise vor der Ebene einer derartigen Figur die Gesichtslinien, so sieht man, wie

dies Fig. 59 B veranschaulicht, neun Felder, von denen hier nur die mittle binokular gesehene Längsreihe in Betracht kommt. Wie solche Versuche in exakter Weise auf einer ganz ebenen schwarzen, weißen oder grauen Fläche mit Benützung eines binokular gesehenen Gitters anzustellen sind, ist weiter unten beschrieben.

Da durch Vereinigung zweier gleicher unokularer Farben nur wieder dieselbe Farbe entsteht (vgl. S. 214), so zeigt das obere und das untere Feld der mittlen Längsreihe je eine der beiden ungleichen Farben, welche im Mittelfelde zu einer dritten Farbe vereinigt sind, und es lässt sich letztere bequem mit jeder der beiden ersteren vergleichen. Dabei ergiebt sich, dass diese dritte Farbe zwar keine ganz konstante, aber stets heller als die dunklere und dunkler als die hellere der beiden Farben ist, aus deren binokularer Mischung sie entstand, wenn sie nicht im besonderen Falle der einen gleicht. Wiederholt man

Fig. 59 A.

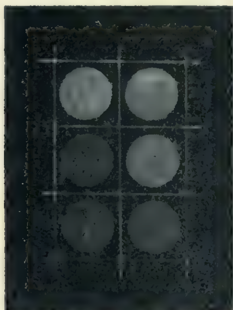
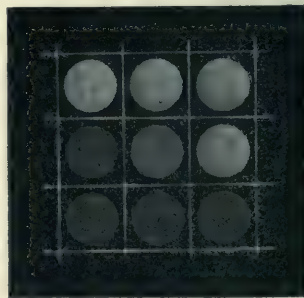


Fig. 59 B.



mit genügend langen Pausen den Versuch öfter, so zeigt sich, dass die auf den ersten Blick erscheinende Mischfarbe bald der einen, bald der andern jener beiden Farben ähnlicher ist oder im Grenzfall ihr gleich scheint. Dreht man, was als Kontrolversuch zu empfehlen ist, die Fig. 59 A um 180°, so dass die Bilder der beiden ungleichen Scheiben des mittlen Paares auf der Doppelnetzhaut ihren Platz vertauschen, so erhält man öfters vom mittlen Felde eine andere Mischfarbe als bei der anfänglichen Lage.

In Fig. 59 ist die Verschiedenheit der beiden unokularen Lichtstärken nicht groß; je größer man sie wählt, desto leichter tritt der Fall ein, dass die binokulare Mischfarbe nicht im ganzen Felde dieselbe ist, oder dass das Feld auf den ersten Blick teils in der Farbe des oberen, teils in der des unteren Feldes erscheint. Letzterenfalls gehen diese beiden Farben bald schroffer, bald mehr allmählich ineinander über.

Je größer die Verschiedenheit der beiden unokularen Lichtstärken ist, desto strenger ist darauf zu achten, dass die Hauptbedingungen, welche bei dem Versuche vorausgesetzt sind, auch wirklich erfüllt werden. Die eine dieser

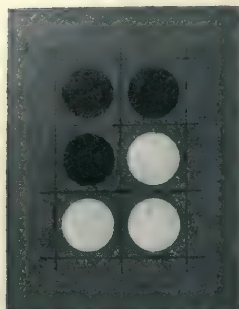
Bedingungen ist, dass in dem Augenblicke, wo dem Beobachter die Felder sichtbar werden, seine Gesichtslinien bereits die Stellung haben, welche zu einer genau korrespondierenden Lage der bezüglichen Netzhautbilder nötig ist. Die andere Hauptbedingung ist, dass man bei jedem Einzelversuche schon vor dem Erscheinen der Felder bestimmt hat, ob man das Mittelbild mit dem oberen oder mit dem unteren Bilde der Mittelreihe vergleichen will. Ersterenfalls muss man den Blickpunkt auf den Zwischenraum zwischen dem oberen und dem mittlen Felde, letzterenfalls zwischen dieses und das untere Feld verlegen und dementsprechend die Gesichtslinien schon vor dem Versuche eingestellt haben.

Man erreicht dies alles mit Hilfe einer Glastafel, welche an einem Stativ in senkrechter Richtung verschiebbar und mit einem rechtwinkligen Liniengitter versehen ist, welches hier an die Stelle des in Fig. 59 A auf dem Papiere befindlichen Gitters zu treten hat. Befindet sich auf dem Tische, über welchem die horizontale Glastafel in passender Höhe eingestellt ist, ein ganz homogenes schwarzes Papier, so müssen die Linien des Gitters auf dem Glase weiß, bei Benutzung eines weißen Papieres schwarz sein, während zu einem grauen Papiere beide Gitterarten passen. Nachdem man den Kopf in passender Höhe über der Glastafel irgendwie fixiert hat, stellt man die Gesichtslinien auf die Entfernung der Glastafel ein, indem man die Linien des Gitters betrachtet, und ordnet dann die sechs kleinen Scheiben auf dem Papiere so an, dass jedes Scheibenbild, sei es ein binokular oder ein nur unokular gesehenes, in einem Quadrate des Gitters ebenso erscheint, wie in Fig. 59 B. Die ganz richtige Lagerung der Scheiben erkennt man mit großer Genauigkeit daran, dass die binokular gesehenen Scheibenbilder der Mittelreihe nicht in der Ebene des Papieres auf dem Tische, sondern in der Ebene des Gitters erscheinen. Sobald eines dieser Bilder dauernd unterhalb oder oberhalb des Gitters zu schweben scheint, haben die beiden bezüglichen Papierscheiben erstenfalls einen zu kleinen, letztenfalls einen zu großen gegenseitigen Abstand. Ob die unokularen Bilder dem Beobachter in der Ebene des Glases oder des Papieres erscheinen, ist hier gleichgültig. Durch eine schwarze Samtmaske oder durch einen vor dem Gesichte befindlichen schwarzen Schirm mit zwei Löchern macht man das Spiegelbild seines Gesichtes unschädlich.

Nach dieser Vorbereitung lässt man von einem Gehilfen ein steifes, ganz homogenes graues Papier horizontal über das Papier mit den Scheiben halten, und wartet, ohne die Lage seines irgendwie gestützten Kopfes zu ändern, so lange, bis alle Nachwirkungen der früheren Betrachtung der Scheiben verklungen sind, fixiert dann diejenige Gitterlinie, welche vorher zwischen den beiden zu vergleichenden Scheibenbildern erschien, und lässt endlich das graue Papier wieder wegziehen. Unter solchen Umständen gelingt es mir leicht, bei nicht zu großer Verschiedenheit der beiden unoku-

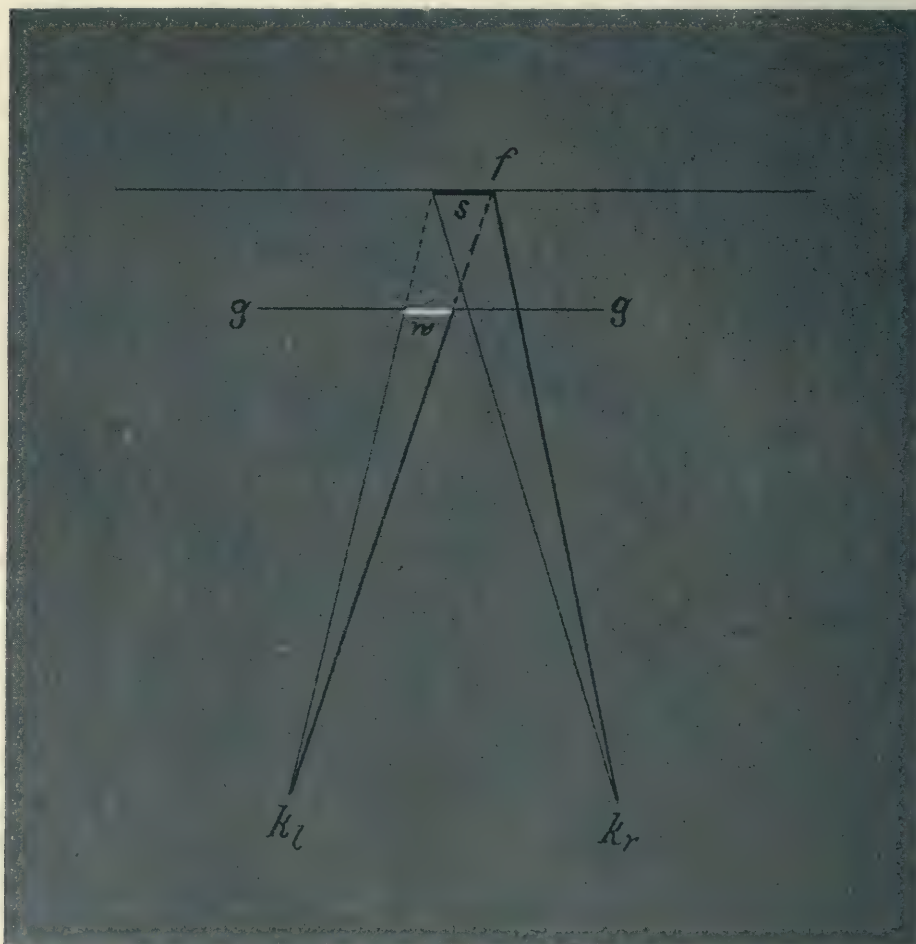
laren Lichtstärken, das mittle Scheibenbild sofort in einer homogenen Farbe zu sehen, welche, wie gesagt, bei wiederholten Versuchen nicht immer wieder dieselbe, sondern bald der des oberen, bald der des unteren Scheibenbildes der Mittelreihe ähnlicher ist und bei etwas verlängerter Betrachtung ihre Qualität ändern kann.

Fig. 60.



Wenn ich aber bei guter Beleuchtung schwarze und weiße Scheiben auf grauem Grunde, wie sie Fig. 60 zeigt, zum Versuche wähle, so gelingt es mir zwar auch, das mittle Scheibenbild in einer homogenen Farbe zu sehen, doch ist dieselbe nur zuweilen von den beiden anderen Farben erheblich verschieden und meist dem unteren weißen Scheibenbilde der Mittelreihe oder seltener dem oberen schwarzen Scheibenbilde nahezu oder völlig gleich. Überdies wechselt leicht

Fig. 61.



bei etwas verlängerter Betrachtung trotz möglichst unverrückter Augenstellung die Farbe des Scheibenbildes zwischen Schwarz und Weiß, sei es

an beschränkter Stelle oder im Ganzen, und dieser Farbenwechsel kann sich so schnell vollziehen, dass die Zwischenstufen der beiden Farben nicht deutlich zur Wahrnehmung kommen. Dabei scheint gewöhnlich das Scheibenbild zu glänzen.

Hier zeigt sich also in besonders ausgeprägter Weise ein Wettstreit der beiden Grenzfarben. Doch sieht man niemals an einem und demselben Punkte des Feldes die schwarze und die weiße Farbe zugleich, und ebensowenig die eine hinter der anderen, wie dies der Fall sein würde, wenn die eine in der Ebene des Gitters, die andere dahinter auf dem entfernteren Papiere erschiene (vgl. S. 221). Ein derartiges räumlich gesondertes Erscheinen der beiden Farben tritt selbst bei der folgenden Abänderung des Versuches nicht ein.

Man bringe das Gitter wieder statt auf der Glasplatte auf grauem Papiere so an, wie dies S. 232 beschrieben wurde. In ein Viereck dieses

Fig. 62.

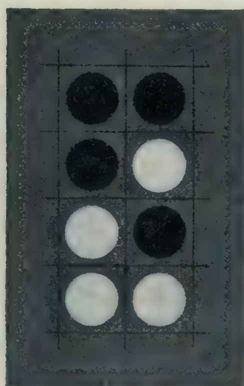


Fig. 63.



Gitters lege man eine schwarze Scheibe (*s* in Fig. 61) und auf die Glasplatte (*gg*) eine kleine weiße Scheibe (*w*), welche für das eine z. B. linke Auge denselben Gesichtswinkel hat, wie die schwarze Scheibe auf dem Papiere, und die letztere genau deckt (vgl. Fig. 61). Stellt man dann die Gesichtslinien auf das Papier ein, so erscheint die weiße Scheibe in Doppelbildern, deren eines sich mit dem Bilde der nur vom rechten Auge gesehenen schwarzen Scheibe deckt. Dabei kommt es nie vor, dass die weiße und schwarze Farbe, jede rein für sich, in verschiedener Entfernung erscheinen, nämlich die weiße näher, und die schwarze in derselben Richtung dahinter in größerer Entfernung. Das Ergebnis ist vielmehr so, wie bei der Benutzung der Fig. 60. Der analoge Versuch lässt sich mit zwei grauen Scheiben von verschiedener Lichtstärke auf weißem oder schwarzem Grunde anstellen, wobei kein Wettstreit sichtbar ist.

Dies alles beweist, dass hier die Einheit der Farbe und die Einheit der Sehrichtung zwangsweise verbunden sind.

Wenn man unter dem erwähnten Gitter der Glasplatte vier teils weiße, teils schwarze Scheiben auf einer grauen Fläche so anordnet, wie es Fig. 62 und 63 zeigt, so sieht man unter den erwähnten Bedingungen wieder drei Reihen von Scheibenbildern, doch enthält die Mittelreihe jetzt zwei durch binokulare Deckung ungleichfarbiger Scheiben entstandene und den Wettstreit zeigende Bilder. Dabei ist bemerkenswert, dass sich diese beiden Bilder gleichzeitig in ganz verschiedenen Phasen des Wettstreites befinden können, und dass also im binokularen Sehfelde an jeder Stelle unabhängig von den anderen Stellen der Wettstreit der unokularen Grenzfarben ablaufen kann.

Alle diese Erscheinungen, sowohl die bei nicht zu großer Verschiedenheit der beiden Farben wechselnde Art ihrer binokularen Mischfarbe, als auch die Phänomene des Wettstreits sind unserer Willkür entrückt. Wenn man sich vor dem Sichtbarwerden des binokularen Scheibenbildes noch so lebhaft eine bestimmte Farbe desselben vorstellt, so hat dies doch keinen Einfluss auf die dann wirklich erscheinende, und ebenso treten die verschiedenen Phasen des Wettstreites nicht nur ohne, sondern auch wider unseren Willen ein.

Wettstreit entsteht da, wo zwei verschiedene Grenzfarben zur Deckung kommen. Bei den in § 52 beschriebenen Versuchen handelte es sich auch um binokulare Deckung zweier verschiedener Farben, aber dort war stets nur die eine der beiden unokularen Farben eine Grenzfarbe und dementsprechend fehlte der Wettstreit vollständig. Je verschiedener die beiden sich deckenden Grenzfarben, desto auffallender ihr Wettstreit. Eine sich scharf absetzende Grenzfarbe ist im Vorteil gegenüber einer verwaschen begrenzten u. a. m. Hier galt es nur zu zeigen, dass auch im Falle des Wettstreites auf jeder einzelnen binokularen Sehrichtungslinie in jedem Augenblicke stets nur eine Farbe erscheint, sei es eine der beiden unokularen oder eine, die sich als ein Gemisch beider bezeichnen lässt. Wenn einmal beide unokularen Farben innerhalb eines binokularen Scheibenbildes zugleich nebeneinander erscheinen, so sind sie doch nicht durch eine scharfe Grenze voneinander geschieden, sondern die eine geht durch alle Zwischenfarben in die andere über.

Die mit Benützung des beschriebenen Gitters auf der Glastafel und kleiner Papierscheiben anzustellenden Versuche sind auch in anderer Beziehung belehrend. Es wurde schon erwähnt, dass bei ganz richtiger Anordnung der Scheiben die durch binokulare Deckung zweier Scheiben entstandenen Bilder der Mittelreihe genau in der Ebene der Gitterlinien erscheinen. Dies gilt jedoch von dem durch binokulare Deckung der ungleichfarbigen Scheiben entstandenen mittlen Bilde der Reihe nur insoweit, als die Verschiedenheit der Farben keine zu große ist. Zeigt dieses Bild infolge zu großer Verschiedenheit der beiden Farben nur die eine, oder kommt es zu einem Wettstreit, so ist auch der Ort des Bildes innerhalb der ihm

zukommenden Sehrichtung nicht mehr ein fest bestimmter, und man kann es dann bald in der Ebene des Gitters, bald auf dem darunter liegenden Papiere sehen.

In ähnlicher Weise, wie hier die binokulare Deckung zweier kleiner Felder von kongruenter Form aber ungleicher Farbe auf beiderseits gleichem Grunde, ließe sich nun auch die binokulare Deckung kleiner Felder von gleicher Farbe auf beiderseits ungleichfarbigem Grunde und endlich der Fall besprechen, wo bei kongruenter Form sowohl die Farbe des Feldes als die des Grundes beiderseits verschieden ist. Es ergeben sich jedoch dabei betreffs der binokularen Mischung keine neuen Gesichtspunkte, wenngleich eine möglichst erschöpfende, auf eigne Beobachtung gegründete Kenntnis der hierher gehörigen Erscheinungen für denjenigen wünschenswert ist, der sich die Berechtigung zur Kritik der Ergebnisse der auf diesem Gebiete erfahrenen Forscher erwerben will.

Über die Erscheinung des Glanzes. Die oben erwähnte Erscheinung des Glanzes erfordert noch eine kurze Besprechung, obwohl derselbe in ebenso deutlicher Weise auch beim einäugigen Sehen vorkommt, wie dies schon Wundt hervorgehoben hat. Wenn auf einer Fläche, gleichviel ob sie nur mit einem Auge gesehen wird, oder ob sie beiden Augen gleiche und sich genau deckende Bilder gibt, ein Hell erscheint, das wir nicht als eine der Fläche eigentümliche »wirkliche«, sondern nur als eine zufällige Farbe derselben auffassen (vgl. § 4), so kann uns die Fläche glänzend erscheinen. Dabei ist meist schon die Art der Verteilung von Hell und Dunkel auf der Fläche entscheidend. Ein treues photographisches Abbild einer solchen Fläche kann ebenfalls den Eindruck des Glanzes machen, sowohl bei einäugigem als bei doppeläugigem Sehen. Dies beweist schon, dass die Erscheinung des Glanzes nicht an das Binokularsehen gebunden ist. Bei letzterem kann es allerdings vorkommen, dass die Lichtreflexe, welche die Fläche glänzend erscheinen lassen, nur das eine Auge treffen, und dass daher der Glanz verschwindet, wenn wir dieses Auge schließen; ebenso kann es vorkommen, dass die Lichtreflexe beiden Augen verschieden und an verschiedenen Stellen der Fläche erscheinen. In solchen Fällen kommen, ähnlich wie bei den obigen Versuchen, ungleiche unokulare Farben zu binokularer Deckung.

Alle diese Arten des Glanzes treten schon beim ersten Anblick der Fläche auf, und selbst eine nur momentane Beleuchtung reicht zur Erscheinung des Glanzes hin. Bewegungen oder Intensitätsänderung der Lichtquelle oder auch bloße Kopfbewegungen bewirken Änderungen der Helligkeit oder Lage der Reflexe, und dasselbe tun Bewegungen der reflektierenden Fläche. Dabei entsteht sowohl bei einäugigem als bei doppeläugigem Sehen ein unruhig wechselnder Glanz, wie ihn in ausgeprägtester Weise eine bewegte Wasserfläche zeigen kann. Eine solche, sich immer wieder ändernde Verteilung von Hell und Dunkel auf der gesehenen Fläche

kommt bei dem oben beschriebenen Wettstreit zweier unokularer Farben ebenfalls vor.

Aus alledem geht hervor, dass die Erscheinung des Glanzes beim binokularen Sehen nichts gegen den oben aufgestellten Satz beweist, nach welchem die auf einer und derselben Sehrichtungslinie erscheinende binokulare Farbe in jedem einzelnen Augenblicke eine einfache ist, wenngleich sie ebenso wie eine unokulare in verschiedener Weise gesehen werden kann (vgl. § 49).

Eine vorzügliche Darlegung der Bedingungen, unter denen die Erscheinung des Glanzes auftritt, hat Helmholtz in seinem Handbuch der physiologischen Optik gegeben, und in der zweiten Auflage dieses Werkes findet man auch ein umfassendes Verzeichnis der bezüglichen Litteratur. Nach der Ansicht von Helmholtz ist die Erscheinung des binokularen oder, wie er sagt, stereoskopischen Glanzes »für die Theorie der Thätigkeit beider Netzhäute deshalb von Interesse, weil daraus mit Sicherheit hervorgeht, was bei den verschiedenen Aussagen verschiedener Beobachter über die Erfolge der binokularen Deckung verschiedener Bilder vielleicht zweifelhaft bleiben könnte, dass zwei heterogene Lichtwirkungen auf korrespondierende Netzhautstellen stets einen durchaus anderen sinnlichen Eindruck machen, als zwei gleichartige Einwirkungen auf dieselben Stellen«.

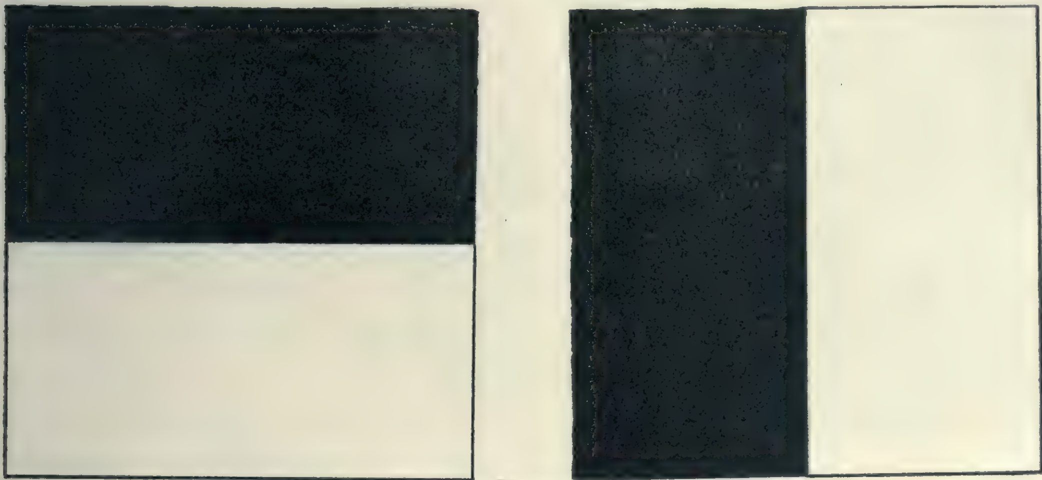
Wenn man aber z. B. einen schwarzen Buchstaben auf weißem Grunde oder einen weißen auf schwarzem Grunde zuerst mit richtig eingestellten Gesichtslinien binokular und sodann bei etwas geänderter Convergenz eines seiner beiden Doppelbilder nur unokular fixiert (vgl. § 51), so wird Niemand sagen können, dass das letztere Bild »einen durchaus anderen sinnlichen Eindruck mache«, als das Bild des zuvor binokular fixierten Buchstabens; die beiden Eindrücke sind vielmehr zum Verwechseln ähnlich. Und doch finden im einen Falle »zwei gleichartige Einwirkungen« auf zwei korrespondierenden Stellen, im andern auf ganz denselben Stellen zwei »heterogene« Einwirkungen statt, nämlich einerseits die Einwirkung des von einem schwarzen bzw. weißen Buchstaben, anderseits die Einwirkung des vom weißen bzw. schwarzen Grunde ausgehenden Lichtes. Dasselbe gilt von den bei binokularer Deckung der beiden Hälften der Fig. 58 auf S. 230 gesehenen Buchstaben; die von beiden Augen zugleich gesehenen unterscheiden sich oft gar nicht und nur bisweilen kaum merklich von den nur mit einem Auge gesehenen. Wenn man freilich in der linken Hälfte der Figur die Buchstaben weiß und den Grund schwarz machen würde, während in der rechten Hälfte die Buchstaben schwarz auf weiß bleiben, so würden uns die nur vom linken Auge gesehenen Buchstaben weiß und die nur vom rechten gesehenen schwarz erscheinen, die von beiden Augen zugleich gesehenen aber würden, insoweit es überhaupt vorübergehend gelänge, sie zu genauer binokularer Deckung zu bringen, das Phänomen des Wettstreites zeigen können, wie dies bei den durch Fig. 60 illustrierten Versuchen beschrieben wurde.

Helmholtz hat nicht beachtet, daß sich aus zwei heterogenen Lichtwirkungen auf korrespondierende Stellen nur eine einfache Farbe ergibt, die allerdings eine inkonstante und sogar ziemlich schnell wechselnde sein kann, sich aber nie in zwei gleichzeitig auf derselben Sehrichtungslinie erscheinende unokulare Farben, z. B. im vorliegenden Falle in ein völliges Weiß und ein völliges

Schwarz spaltet. Damit fällt auch eine Hauptstütze seiner Theorie des Binokularsehens und seiner Polemik gegen die Annahme eines angeborenen Zusammenhanges zwischen dem Einfachsehen der Farben und der Identität der Sehrichtungslinien zweier Deckstellen. Dies möge hier erwähnt sein, weil v. Kries in seinen Zusätzen zu einem kürzlich erschienenen Neudruck der ersten Auflage des Werkes von Helmholtz wieder für dessen Theorie des binokularen Sehens eingetreten ist.

§ 54. Die binokulare Farbenmischung bei binokularer Deckung inkongruenter Bilder. Bei den im vorhergehenden Paragraphen besprochenen Fällen wurden kongruente Figuren auf korrespondierenden Stellen der beiden Netzhäute abgebildet; nur in der Lichtstärke waren die Figuren verschieden. Viel häufiger ist beim gewöhnlichen Sehen der Fall, dass kleinere oder größere korrespondierende Bezirke der

Fig. 64.



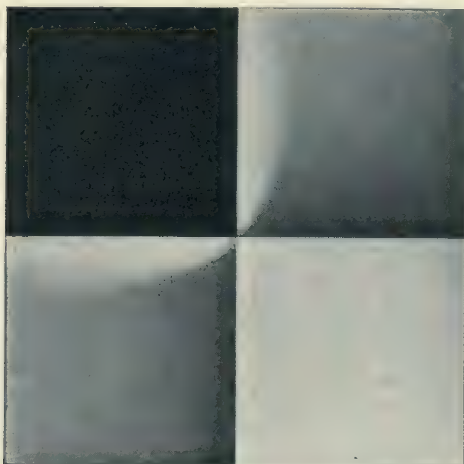
beiden Netzhäute mit völlig inkongruenten Bildern bedeckt sind. Bei Betrachtung naher Dinge, hinter denen noch andere sichtbar sind, bildet die Inkongruenz der beiden Gesamtnetzhautbilder mit Ausnahme der Bilder des eben fixierten Objektes sogar die Regel. Auch die beiden Netzhautmitten können inkongruente Bilder erhalten, wenn ein Ding, das dem Gesichte näher als das fixierte liegt, in ungleichseitigen Doppelbildern erscheint. Trotz der großen Mannigfaltigkeit der hierher gehörigen Tatsachen genügen einige wenige, der oben erwähnten Abhandlung Panum's entlehnte Beispiele zur Einsicht in das, was dabei bezüglich der binokularen Farbenmischung besonders wesentlich ist.

Bringt man zwei Felder, wie sie Fig. 64 in verkleinertem Maßstabe zeigt, in ein Stereoskop, und ist für das Scharfsehen der Grenzlinien zwischen Weiß und Schwarz gesorgt, so erhält man ein binokulares Bild etwa von der Art des in Fig. 65 dargestellten. Man sieht ebensowohl im

ersten Augenblick als bei längerer zwangloser Betrachtung stets die beiden sich durchkreuzenden Grenzlinien zwischen Weiß und Schwarz, nie aber entweder nur die eine oder die andere der beiden zur Deckung gebrachten Figuren.

Im linken oberen Viertel des binokularen Bildes deckt sich unokulares Schwarz mit Schwarz, im rechten unteren Viertel Weiß mit Weiß, in den beiden anderen Vierteln aber kommt unokulares Weiß und Schwarz zur Deckung, und man sieht hier ein graues Gemisch aus Schwarz und Weiß, welches um so leichter zu glänzen scheint, je weniger genau der Forderung völliger Homogenität der sich deckenden Flächen entsprochen ist. Das Mischgrau ist bei verschiedenen Versuchen bald heller, bald dunkler und geht nach der Grenzlinie des schwarzen Viertels hin durch immer hellere Zwischenstufen in ein Weiß, nach der Grenzlinie des weißen Viertels hin durch immer dunklere Stufen in ein Schwarz über. Diese Übergänge sind bald schroffer, bald allmählicher.

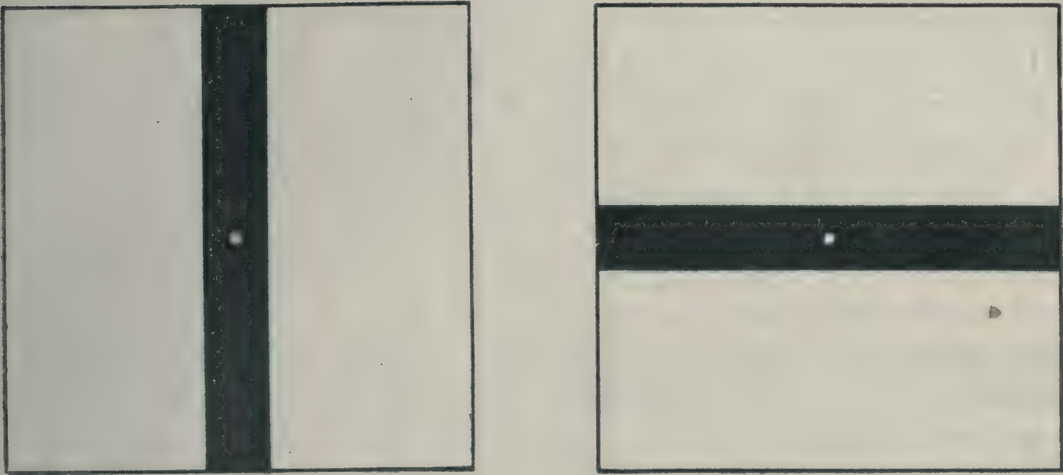
Fig. 65.



Während nämlich im größten Teile eines solchen grauen Viertels indifferentes Weiß mit indifferentem Schwarz gemischt ist, mischen sich in der Nachbarschaft der Grenzlinien je eine Grenzfarbe und eine indifferente, und zwar mischt sich an der Grenze des weißen Viertels das Grenzschwarz mit dem indifferenten Weiß zu einem Schwarz, und an der Grenze des schwarzen Viertels das Grenzweiß mit dem indifferenten Schwarz zu einem Weiß; mit wachsendem Abstande von der Grenzlinie nimmt hier die Weißlichkeit, dort die Schwärzlichkeit des Gemisches ab und nähert sich dem allgemeinen Mischgrau des Viertels. In der Nähe des Kreuzungspunktes der beiden Grenzlinien mischt sich Grenzweiß mit Grenzschwarz zu einem bis in die Spitze des Winkels reichenden Grau. Es kommt hier, solange die beiden betroffenen Sehfeldstellen gleichartig sind, nie zu einem derartigen Überwiegen der einen Grenzfarbe über die andere, dass eine der beiden hier zusammenstoßenden Grenzlinien auch nur eine kleine Strecke weit ganz unsichtbar würde, sondern es sind selbst bei langer zwangloser Betrachtung beide Grenzlinien bis zu ihrem Durchschnittspunkte sichtbar. Nur bei längerem Stillstande der Augen sieht man bei einer nachfolgenden kleinen Bewegung derselben infolge des Sukzessivkontrastes an der einen oder anderen Grenzlinie einen sehr hellen oder sehr dunklen Streifen, welcher das in ihm gelegene Stückchen der Grenzlinie unsichtbar macht. So wenig

also ein Wettstreit mit völligem Verschwinden einer der beiden Grenzfarben zu sehen ist, ebensowenig ein Wettstreit, bei dem abwechselnd nur eines der beiden unokularen Bilder sichtbar wäre. Auch die absichtlich auf eine

Fig. 66.



der Grenzlinien gerichtete Aufmerksamkeit vermag, selbst in der Nähe des Kreuzungspunktes, die andere nicht zum Verschwinden zu bringen.

Fig. 66 zeigt links einen längsliegenden, rechts einen querliegenden schwarzen Streifen auf weißem Grunde. Bringt man diese entsprechend

Fig. 67.



Fig. 68.



vergrößerte Figur in ein Haploskop, so erhält man einen Eindruck nach Art des in Fig. 67 abgebildeten. Man sieht ein Kreuz, bestehend aus einem mittlen tiefschwarzen Quadrat und vier Schenkeln, die an ihrer Ansatzstelle nicht wie im übrigen schwarz, sondern in einem abgeschwächten Weiß erscheinen

das sich scharf von dem schwarzen Mittelquadrat absetzt und sodann durch die verschiedenen Zwischenstufen des Grau hindurch in das Schwarz des übrigen Schenkels übergeht. Dieser Übergang ist bald schroffer, bald mehr allmählich. Dabei bleiben jedoch die Grenzlinien der Schenkel bis an die Ecke des tiefschwarzen Mittelquadrates sichtbar.

Würden wir mit Hilfe eines durchsichtigen Spiegelglases (vgl. S. 79) die beiden schwarzen Streifen auf weißem Grunde sich gleichzeitig auf einer und derselben Netzhaut abbilden lassen, so würden wir ebenfalls ein Kreuz mit schwarzem Mittelquadrat sehen, aber die Schenkel würden in allen ihren Teilen hellgrau gefärbt erscheinen, etwa wie in Fig. 68.

Wenn das linke Auge unter sonst ganz gleichen Umständen statt des querliegenden schwarzen Streifens nur den homogenen weißen Grund, das rechte aber den längsliegenden schwarzen Streifen sähe, so würde im binokularen Felde nur der letztere, und zwar in seiner ganzen Länge schwarz gefärbt erscheinen, weil dies die (innere) Grenzfarbe seiner beiden Grenzlinien ist und diese schwarze Grenzfarbe das indifferente Weiß der korrespondierenden Stelle des anderen Sehfeldes in der Mischung beider weitaus überwiegt. Die weiße (äußere) Grenzfarbe seiner beiden Grenzlinien würde sich längs des ganzen Streifens mit dem korrespondierenden indifferenten Weiß des Grundes wieder zu einem Weiß mischen. Letzteres ist, wenn dem linken Auge zugleich der schwarze querliegende Streifen sichtbar ist, an der Stelle der Durchkreuzung nicht mehr möglich; denn das Grenzweiß des längsliegenden Streifens mischt sich hier nicht mehr mit dem korrespondierend gelegenen indifferenten Weiß, sondern mit den (inneren) schwarzen Grenzfarben der beiden Grenzlinien des querliegenden Streifens, und aus der Mischung dieser schwarzen Grenzfarben mit jenen weißen entsteht das grauliche Weiß an der Ansatzstelle der beiden querliegenden Schenkel des Kreuzes. Dieses Weiß ist um so deutlicher, je breiter der querliegende Streifen und je entfernter also seine Mittellinie von seinen beiden Grenzlinien ist. Denn um so mehr kommt an der Ansatzstelle das in der Nähe dieser Mittellinie liegende Grenzschwarz des querliegenden Streifens gegenüber dem Grenzweiß des längsliegenden in Nachteil. Ganz analog verhält es sich mit der Helligkeit der beiden längsliegenden Schenkel des Kreuzes an ihren Ansatzstellen. Das Gesagte gilt vom ersten Eindrucke und unter der Voraussetzung, dass dabei die beiden unokularen Sehfeldbezirke in gleichem Zustande und die Augen beim Sichtbarwerden der Figur nicht in Bewegung sind. Bei fortgesetzter Betrachtung kommt es dann vor, dass der eine Streifen in seiner ganzen Länge gleichmäßig schwarz, und der andere gänzlich durchbrochen erscheint, oder seltener, dass nur ein Schenkel des Kreuzes sich mit seinem Schwarz ohne Unterbrechung in das Schwarz des kleinen Mittelquadrates fortsetzt. In beiden Fällen genügt es, den Blickpunkt genau parallel zur

Richtung des ununterbrochen erscheinenden Streifens zu bewegen, um sofort die anfänglich gesehene Unterbrechung desselben wieder herzustellen. Bei dieser Augenbewegung verschiebt sich das Bild des ununterbrochenen Streifens auf der Netzhaut in sich selbst und rückt also, abgesehen von seinen weitabliegenden Enden, nicht auf neue Netzhautstellen, das Bild des andern Streifens auf der andern Netzhaut aber verschiebt sich senkrecht zur eigenen Richtung. Dabei wird auf der einen Seite des Streifenbildes ein Netzhautstreifen, der soeben noch nur das schwache Licht des schwarzen Streifens empfing, plötzlich vom starken Lichte des weißen Grundes getroffen, auf der andern Seite ein entsprechender Netzhautstreifen, der soeben noch von diesem starken Lichte bestrahlt war, plötzlich verfinstert: dort wird die weiße (äußere) Grenzfarbe des Streifenbildes plötzlich noch heller, hier die schwarze (innere) Grenzfarbe plötzlich noch dunkler und infolge des momentanen Simultankontrastes auch die Helligkeit der weißen (äußeren) Grenzfarbe erhöht. Diese auf beiden Seiten des Streifens erfolgende Helligkeitssteigerung seines Grenzweiß verschafft demselben von neuem das Übergewicht über das unverändert gebliebene Schwarz des anderen Streifens, dessen Netzhautbild sich nur in sich selbst verschoben hat, und lässt denselben wieder ununterbrochen erscheinen.

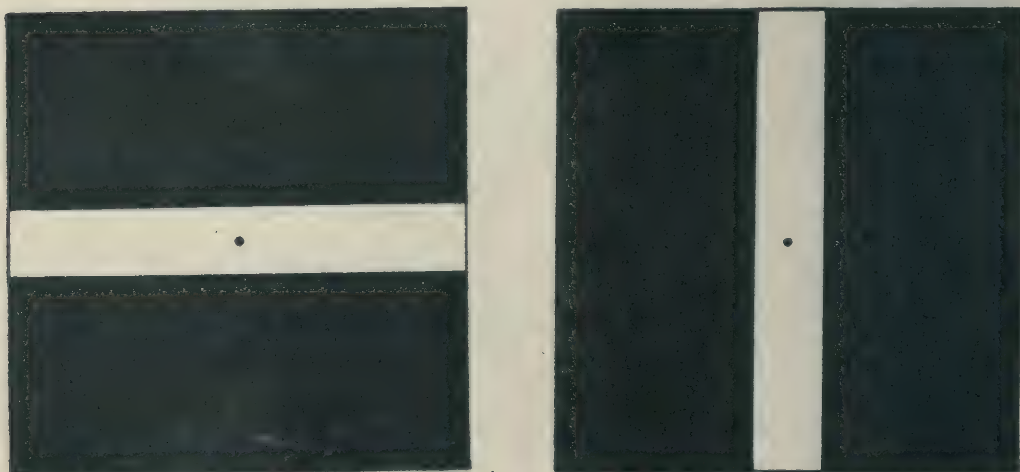
Hiermit steht folgende Thatsache im Einklang: Blickt man genau entlang der Mittellinie des querliegenden Kreuzbalkens hin und her, so wird man sehr bald den längsliegenden Balken in seiner ganzen Länge schwarz und den querliegenden durchbrochen sehen; verlegt man dagegen den Blickpunkt entlang der Mittellinie des längsliegenden Kreuzbalkens, so erscheint sehr bald der querliegende in seiner ganzen Länge schwarz und der andere durchbrochen.

Man kann auch schon auf den ersten Blick nur den einen Streifen mit Sicherheit unterbrochen und den andern in ganzer Länge schwarz sehen, wenn man zuerst z. B. die linke Hälfte der Figur mit einem homogenen Blatt von der Lichtstärke des weißen Grundes zudeckt und dann längere Zeit den Mittelpunkt des querliegenden Streifens fixiert. Dabei adaptiert sich die betroffene Stelle des rechtsäugigen Sehfeldes mehr oder weniger an das Streifenbild. Entfernt man dann das weiße Deckblatt des anderen, längsliegenden Streifens, so empfängt das linke Auge den frischen Eindruck desselben und man sieht nun sekundenlang nicht nur diesen Streifen in seiner ganzen Länge tiefschwarz, sondern auch die beiden querliegenden Schenkel des Kreuzes erst in einigem Abstande von der früheren Durchkreuzungsstelle beginnen; auch ist ihre Farbe nicht mehr schwarz, wie sonst, sondern nur schwarzgrau.

In keinem der beschriebenen Fälle vermag die absichtlich auf den einen oder anderen Balken des Kreuzes oder auf irgendwelche Stelle einer Grenzlinie gerichtete Aufmerksamkeit die durch Augenbewegungen hervor-

gerufenen Änderungen der Erscheinungsweise des binokularen Bildes zu verhindern und ebensowenig an den zuletzt beschriebenen Folgen einseitiger Adaptation im somatischen Sehfelde etwas zu ändern. Auch um einen Wettstreit zweier sich schneidender Grenzlinien an ihrer Kreuzungsstelle handelt es sich nicht, sondern nur um die Thatsache, dass bei der binokularen Mischung die Grenzfarben einer Grenzlinie zweier stärker verschiedener Farben im Vorteil sind gegenüber den Grenzfarben einer Grenzlinie zweier weniger verschiedenen Farben, und dass die Grenzfarben einer schärfer gesehenen Grenzlinie im Vorteil sind gegenüber den Grenzfarben einer infolge eines unvollkommenen Augenstillstandes verwaschen erscheinenden Grenze.

Fig. 69.



Die beiden Beispiele von Kreuzung unokular gesehener Grenzlinien im binokularen Felde werden hinreichen, um zu zeigen, wie wichtig es ist, den ersten Eindruck des binokularen Bildes zu erfassen, und wie groß der Einfluss der Augenbewegung auf die Beschaffenheit dieses Bildes ist. Bei den bisherigen Untersuchungen des sogenannten Wettstreites der Sehfelder hat weder das Eine noch das Andere irgend zureichende Berücksichtigung gefunden.

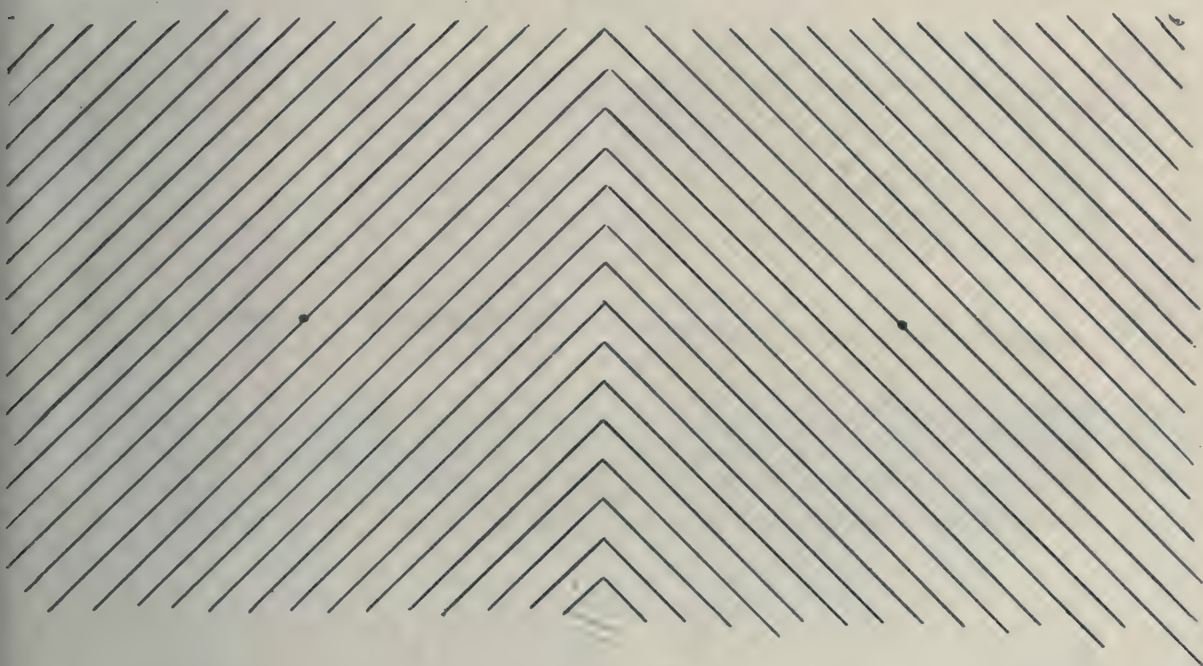
Analoge Beobachtungen wie an Fig. 66 kann man an Fig. 69 machen, welche die beiden Streifen weiß auf schwarzem Grunde zeigt.

Für schmälere Streifen gilt im wesentlichen dasselbe wie für die Streifen der Fig. 66 und Fig. 69, nur wird es dann schwerer, die Helligkeitsverschiedenheiten an der Kreuzungsstelle zu bemerken. Bei feinen Strichen reduziert sich schließlich das kleine Quadrat an der Kreuzungsstelle fast auf einen Punkt, und weil die beiden Grenzlinien jedes Striches einander fast unmittelbar benachbart sind und bis an jenes minimale Quadrat sichtbar bleiben, so erkennt man schließlich auch nicht mehr

dass in unmittelbarer Nähe des Kreuzungspunktes die Farbe eine hellere, oder wenn die Striche weiß auf schwarz sind, eine dunklere ist, als im Kreuzungspunkte selbst. Dabei kommt es nicht vor, dass einmal der eine oder andere Strich teilweise oder ganz verschwindet, auch wenn man die Augen einige Zeit möglichst still hält.

Bringt man, wieder nach Panum's Vorgang, zwei Scharen paralleler Striche von verschiedener Richtung zu binokularer Deckung, ohne dafür gesorgt zu haben, dass sich der primäre Eindruck des binokularen Bildes streng von den nachfolgenden sondern lässt, verfährt man vielmehr nach einer der gewöhnlich haploskopischen Methoden, so erhält man öfters nicht

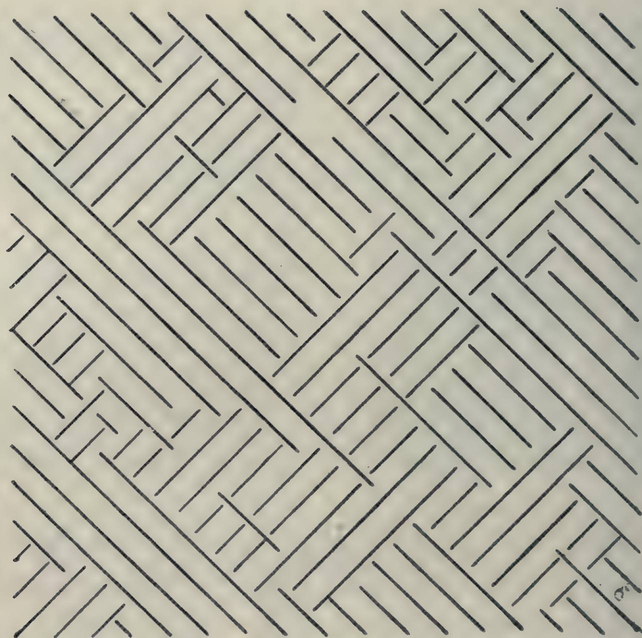
Fig. 70.



das von vornherein zu erwartende Bild eines regelmäßig quadratischen Gitters. An einzelnen Stellen erscheinen nämlich nur die Striche der einen Schar, während die der anderen hier fehlen. In stark ausgeprägter Weise zeigt dies die von Panum entlehnte Fig. 70. Hat man zuvor auf zwei einander entsprechenden Stellen der beiden Halbbilder der Figur je eine schwarze Marke gemacht, um den beiden Gesichtslinien einen Haltpunkt zu geben und sie in bestimmter Stellung festzuhalten, und sieht man nun irgendwo in der Nähe des Blickpunktes die Striche der einen Schar verschwinden, so ist man nicht imstande, sie dadurch sofort wieder sichtbar zu machen, dass man seine Aufmerksamkeit den noch sichtbar gebliebenen Teilen der teilweise verschwundenen Striche zuwendet. Man muss vielmehr warten, bis die verschwundenen Teile von selbst wieder erscheinen. Nur zufällig kann einmal dieses Wiedererscheinen mit der Einstellung

unserer Aufmerksamkeit zusammenfallen. Wenn man jedoch, wie dies Helmholtz empfahl, sich vornimmt, die Striche einer Schar zu zählen und dabei in gewohnter Weise den Blickpunkt von einem zum andern springen lässt, so können die gezählten Striche fehlerfrei erscheinen. Dabei verschieben sich aber die Strichbilder auf der Netzhaut, und der Netzhautstrich, welcher das Bild des eben betrachteten Striches der Figur aufnimmt, war zwischendurch von dem Lichte des weißen Grundes bestrahlt worden. So erzeugt also jeder Strich einen neuen primären Eindruck. Die andere Strichschar verschwindet nun während der Zählung durchaus nicht ganz, sondern wird nur stellenweise lückenhaft. Helmholtz giebt an, dass er »vollkommen willkürlich imstande« war, seine »Aufmerksamkeit

Fig. 71.



bald dem einen, bald dem andern Liniensysteme zuzuwenden«, und »dass dann dieses System für einige Zeit allein gesehen wurde«, »und das andere vollkommen« verschwand. Auch Panum sah vorübergehend die eine Strichschar völlig verschwinden. Mir ist dies nur vorgekommen, wenn ich einen Punkt der binokularen Figur längere Zeit fest im Auge behielt, so dass kleine unwillkürliche Augenbewegungen sich bereits durch Nachbilderscheinungen verrieten. In solchen Fällen sah ich einen wirklichen Wettstreit der beiden Strichscharen im ganzen binokularen Bilde, d. h. es war nur je eine mit völligem Ausschluss der anderen sichtbar, doch konnte ich deren Erscheinen und Verschwinden nicht willkürlich beeinflussen. Während der Zeit, wo die eine Strichschar verschwunden ist, kann man sie nicht zum Gegenstande seiner Aufmerksamkeit machen. Es könnte also höchstens

Fig. 72.

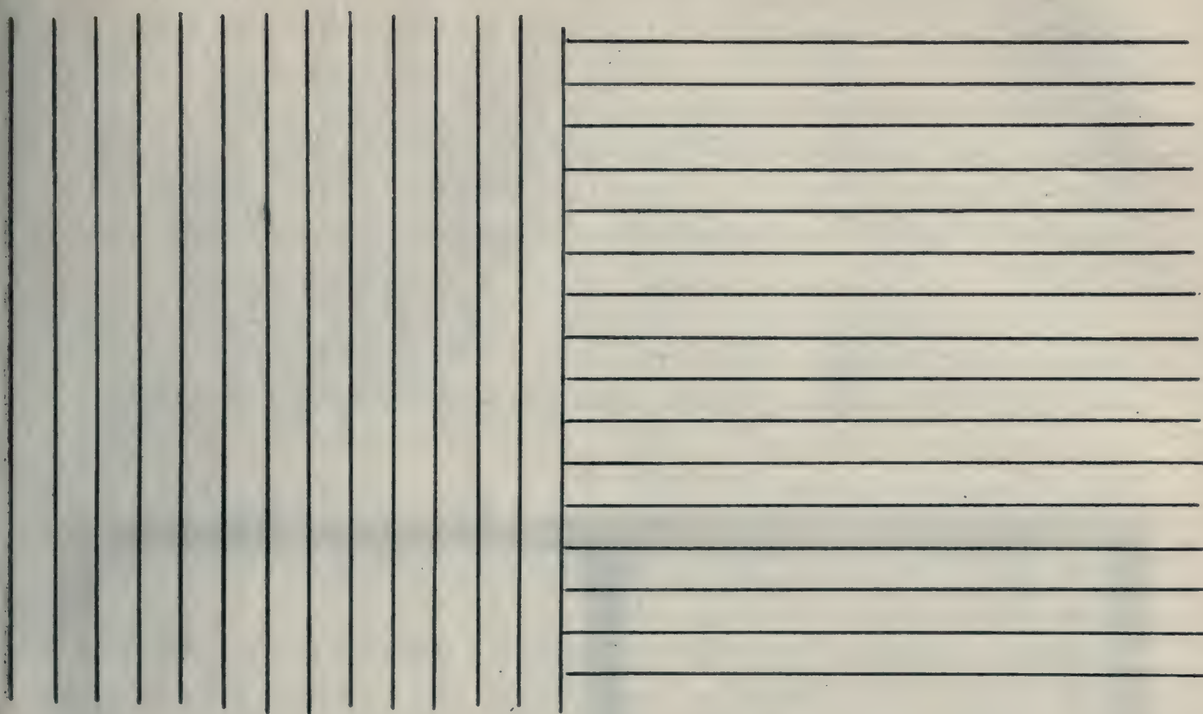
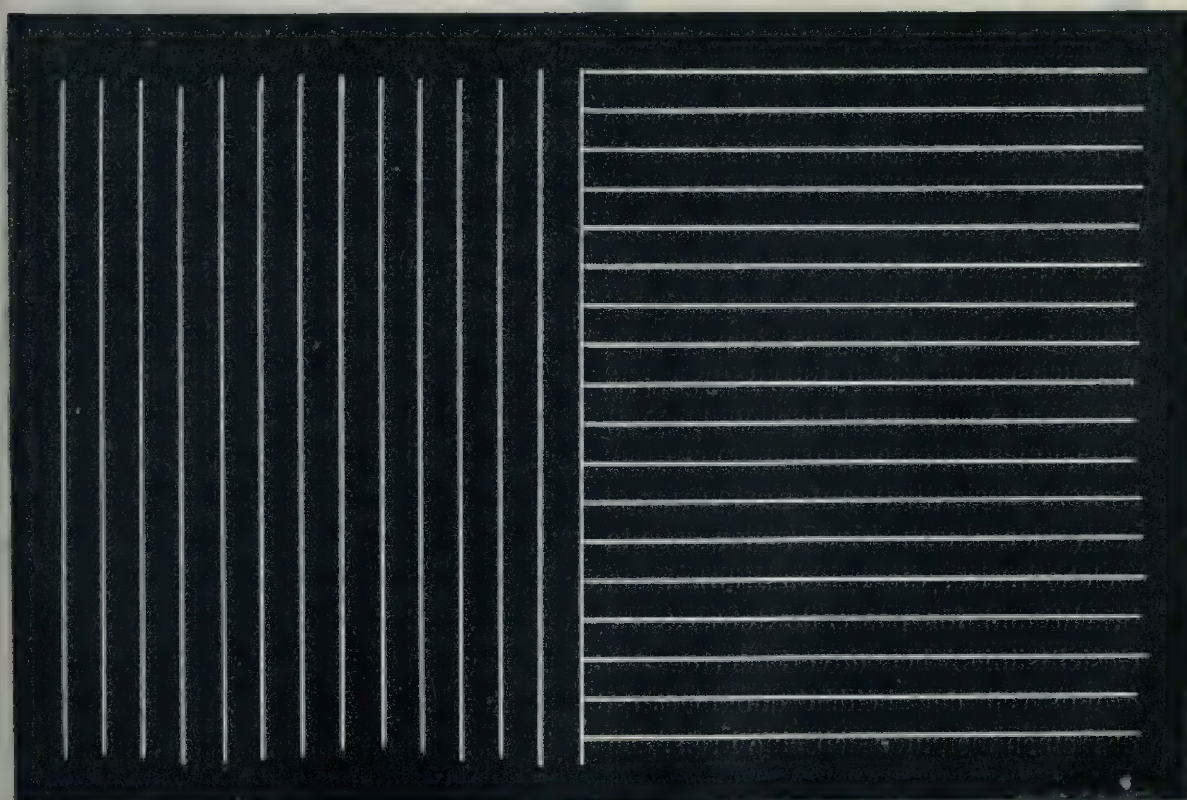


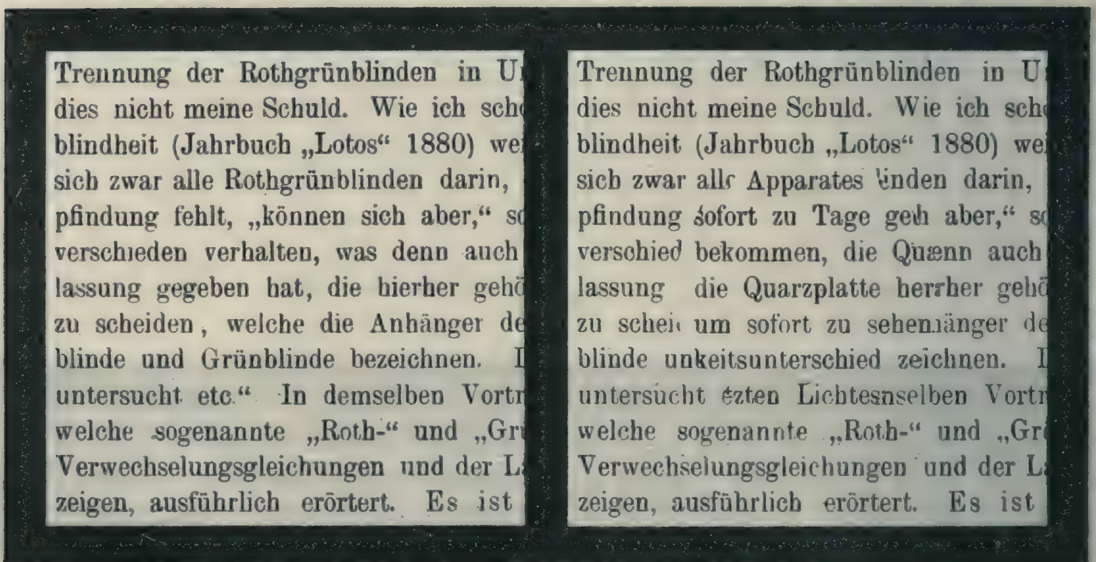
Fig. 73.



die Vorstellung ihres Vorhandenseins ihr Wiedererscheinen beschleunigen. Die eben allein sichtbare Strichschar aber fesselt von selbst unsere Aufmerksamkeit, und ob man diese Fesselung absichtlich verlängern und dadurch das andere Strichsystem länger unter der Schwelle der Sichtbarkeit zu halten vermag, lässt sich begreiflicherweise schwer entscheiden, um so schwerer, als kleine unwillkürliche Augenbewegungen, die sich nicht ausschließen lassen, gerade hier wegen der längeren Adaptation der beiden unokularen Sehfelder an das Bild ihrer Strichschar besonders bedeutungsvoll sind.

Wenn ich dicht unter die Glasplatte, deren Marke ich fixierte, einen sogenannten Momentverschluss mit großem Diaphragma angebracht hatte und das Bild nur einen, zur ganz deutlichen Wahrnehmung seines mittleren

Fig. 74.


Trennung der Rothgrünblinden in U
dies nicht meine Schuld. Wie ich sch
blindheit (Jahrbuch „Lotos“ 1880) we
sich zwar alle Rothgrünblinden darin,
pfindung fehlt, „können sich aber,“ s
verschieden verhalten, was denn auch
lassung gegeben hat, die hierher gehö
zu scheiden, welche die Anhänger de
blinde und Grünblinde bezeichnen. I
untersucht etc.“ In demselben Vortr
welche sogenannte „Roth-“ und „Gr
Verwechselungsgleichungen und der L
zeigen, ausführlich erörtert. Es ist

Trennung der Rothgrünblinden in U
dies nicht meine Schuld. Wie ich sch
blindheit (Jahrbuch „Lotos“ 1880) we
sich zwar allr Apparates 'inden darin,
pfindung sofort zu Tage geh aber,“ s
verschied bekommen, die Quænn auch
lassung die Quarzplatte herrher gehö
zu schei um sofort zu sehenänger de
blinde unkeitsunterschied zeichnen. I
untersucht ezten Lichtesnselben Vortr
welche sogenannte „Roth-“ und „Gr
Verwechselungsgleichungen und der L
zeigen, ausführlich erörtert. Es ist

Teiles hinreichenden Bruchteil einer Sekunde sichtbar machte, sah ich stets beide Strichsysteme ganz gleich deutlich. Auch hier empfiehlt es sich, die Versuchsbedingungen durch Benutzung der Figuren 72 und 73 zu variieren.

Wie wenig man imstande ist, in einem durch Deckung inkongruenter Grenzliniensysteme entstandenen binokularen Bilde das eine oder andere System absichtlich auf Kosten des anderen hervortreten zu lassen, zeigt auch der durch Fig. 74 dargestellte Versuch. Hat man, gleichviel auf welche Weise, die beiden Hälften dieser Figur zu binokularer Deckung gebracht und für passende Refraktion gesorgt (s. S. 231), so ist es leicht, die Gesichtslinien bei unverändertem Konvergenzwinkel zu erhalten, weil der größte Teil der beiden unokularen Bilder identisch ist. Nur in der Mitte des einen befindet sich eine kreisförmige Lücke, die mit einem kreisförmigen Ausschnitt eines anderen Textes ausgefüllt ist. Wenn ich beim Lesen einer

Zeile an der Stelle angekommen bin, wo die beiden verschiedenen Texte durcheinandergehen, so bin ich trotz aller Aufmerksamkeit nicht imstande, die in den eben gelesenen Text hineinpassenden Worte aus der Konfusion der beiden Texte allein hervortreten zu lassen und die des anderen Textes zum Verschwinden zu bringen, und zwar sogar auch dann nicht, wenn ich zuvor den zusammenhängenden Text gelesen und die fraglichen Worte mir eingeprägt habe.

Jedenfalls hat Helmholtz die große Bedeutung der örtlichen Adaptation und der Augenbewegungen auf die sogenannten Wettstreitphänomene nicht beachtet und den Einfluss der willkürlichen Aufmerksamkeit weit überschätzt. Eine neue eingehende Untersuchung unter Berücksichtigung der im Obigen hervorgehobenen Gesichtspunkte ist daher sehr wünschenswert, denn auf den Beziehungen der beiden unokularen Sehfelder untereinander beruht unser binokulares Sehen, und zwar sowohl das normale als das anomale.

Schon in meinen Beiträgen zur Lehre vom Ortssinn der Augen habe ich das Bild, welches man erhält, wenn man mittels einer spiegelnden aber durchsichtigen Glastafel auf einer und derselben Netzhaut gleichzeitig die geradeaus liegenden und gespiegelten Außendinge sich abbilden lässt, in Vergleich gebracht mit dem Bilde, welches beim Zusammenwirken zweier unkongruenter Netzhautbilder im binokularen Sehfelde entsteht. Ein unokularer Blick durch die große Glasscheibe eines Schaufensters zeigt uns hinter dem Fenster bei passenden Beleuchtungsverhältnissen nicht nur daselbst befindliche, sondern zugleich auch auf der Straße befindliche und nur gespiegelte Dinge. Ebenso bieten uns die sogenannten Geisterphotographien, wie sie durch nacheinander erfolgtes Photographieren z. B. eines Zimmers und eines Menschen auf dieselbe Platte hergestellt werden, ein Bild von der Art, wie wir es bei gleichzeitiger Abbildung direkt gesehener und gespiegelter Außendinge auf derselben Netzhaut sehen.

An jedem Punkte der Netzhaut summiert sich unter solchen Umständen die Lichtstärke des einen Bildes mit der kleineren oder größeren des anderen; und diese allgemeine Steigerung der Lichtstärken des zusammengesetzten Bildes hat zur Folge, dass überall da, wo eine Grenzlinie des einen Bildes auf eine homogene Stelle des anderen Bildes fällt, zwar der Unterschied der beiden von den Grenzlinien geschiedenen Lichtstärken derselbe bleibt, ihr Verhältnis aber zu Ungunsten der Deutlichkeit des Sehens verändert wird. Nur wo zwei Grenzlinien der beiden Bilder zusammenfallen, kann in besonderen Fällen das Gegenteil eintreten. Daher sind im allgemeinen die Helligkeitsunterschiede und entsprechend auch die Deutlichkeit des Sehens im zusammengesetzten Bilde kleiner als in jedem der Einzelbilder. Man kann sich hiervon überzeugen, wenn man mit einem schwarzen Schirm bald das direkt Gesehene, bald das Gespiegelte abblendet. Zwar ist es

möglich, durch passende Auswahl und Beleuchtung des Gespiegelten und des direkt Gesehenen ein zusammengesetztes Bild herzustellen, aus dem wir an keiner Stelle die beiden Einzelbilder wieder herauszufinden vermögen; in der großen Mehrzahl der Fälle aber ist uns dies wenigstens an einzelnen Stellen des zusammengesetzten Bildes möglich, auch wenn wir nicht Bewegungen der spiegelnden Glasplatte oder der auf der Netzhaut abgebildeten Dinge zu Hilfe nehmen. Liegt nicht der besondere Fall vor, dass das Spiegelbild eines ebenen Dinges mit der Ebene eines gleichfalls ebenen direkt gesehenen zusammenfällt, so lässt sich auch durch bloße Lageänderung des Kopfes und die dadurch bedingte parallaktische Verschiebung der beiden Einzelbilder eine gesonderte Wahrnehmung derselben erzielen.

In allen Fällen einer derartigen Deckung zweier verschiedener Bilder auf derselben Netzhaut findet nur eine Sonderung der in den beiden Einzelbildern enthaltenen Grenzlinien oder Umrisse statt, nicht aber eine Sonderung der Farben; an jeder Stelle des zusammengesetzten Bildes erscheint in jedem Augenblicke nur eine Farbe. Wenn uns die Umrisse des einen Bildes auf Grund erworbener Motive für die Tiefenwahrnehmung ferner erscheinen als die des anderen, als ob wir das erstere durch das letztere hindurchsähen, so füllt überall nur eine Farbe die zwischen den Grenzlinien liegenden Flächenteile. Enthält das eine Bild schwarze Buchstaben, so erscheinen sie da, wo ein schwarzer Streifen des anderen Bildes über sie hinweggeht, tiefer schwarz als da, wo ein grauer oder weißer Streifen des anderen Bildes sich mit ihnen deckt, und nur bei ganz oberflächlicher Betrachtung werden wir diese Unterschiede da, wo sie nur klein sind, übersehen. Wir können zwar urteilen, dass die Buchstaben des einen Bildes eigentlich alle gleich schwarz sind, und dass der Streif, der sie stellenweise heller macht, dem anderen Bilde angehört, wir vermögen aber nicht die beiden sich hier deckenden und sich deshalb mischenden Farben gesondert hintereinander zu sehen.

Das letztere ist uns nun auch bei der binokularen Deckung zweier inkongruenter Bilder unmöglich. Denn das binokulare Bild zeigt dabei, ähnlich wie das eben besprochene zusammengesetzte unokulare, auf jeder beliebigen Sehrichtungslinie in jedem Augenblicke nur eine einfache, durch binokulare Mischung entstandene Farbe. Wohl aber ist hier die Sonderung der beiden durcheinander geschobenen Grenzliniensysteme durch den relativ großen Helligkeitsunterschied zweier unokularer Grenzfarben dicht an ihrer Grenzlinie außerordentlich erleichtert, sowie dadurch, dass da, wo an der Kreuzungsstelle zweier unokularer Grenzlinien zwei verschiedene Grenzfarben sich mischen, die Kontinuität beider Grenzfarben oder wenigstens der einen durch eine Helligkeitsänderung unterbrochen erscheint. Hierdurch wird verhindert, dass zwei sich kreuzende unokulare Grenzlinien ebenso gesehen werden, wie wenn sie einem und demselben System angehörten.

Dies alles gilt für jeden der kurzen Stillstände des Doppelauges bei seinen sprunghaften Seiten- und Höhenbewegungen; bei jeder Konvergenzänderung kommt auch noch die gegenseitige Verschiebung der beiden unokularen Bilder in Betracht.

Fixieren wir mit beiden Augen eine Marke auf einer nahe vor unserem Gesichte befindlichen Fensterscheibe, so bildet sich die ganze durch das Fenster sichtbare Landschaft auf den beiden Netzhäuten nicht korrespondierend ab, ihre beiden unokularen Bilder erscheinen im binokularen Bilde durcheinandergeschoben. Da wir die sichtbaren Häuser, Bäume, Berge u. s. w. auch bei nur unokularer Betrachtung nach ihren verschiedenen Entfernungen räumlich angeordnet zu sehen vermögen, und jetzt in verschiedener Entfernung und nach ganz verschiedenen Richtungen Gelegenes sich auf der korrespondierenden Netzhautstelle abbildet, so kann jetzt, in Gemäßheit des Gesetzes der identischen Sehrichtung zweier korrespondierender Netzhautpunkte im binokularen Sehraume, ein nahes Haus in derselben Sehrichtung erscheinen wie ein ferner Berg. Bei passenden Lichtstärken beider sehen wir dann den Berg durch das gleichsam durchsichtige näher erscheinende Haus in der Ferne, wobei bald die Einzelteile des Hauses, bald die des Berges besser unterschieden werden, und die auf gleicher Sehrichtungslinie liegende Farbe des Berges und die des Hauses sich zu einer binokularen Farbe mischen, nicht aber die Farbe des einen gesondert hinter der des anderen gesehen wird. Aber dies alles bleibt bei gewöhnlichem Sehen meist unbeachtet, weil unsere Aufmerksamkeit nur der Marke auf dem Fensterglase oder einer auf demselben kriechenden Fliege zugewendet ist, und wir, sobald ein der Landschaft angehöriges und deshalb unokulares, z. B. nach rechts liegendes Bild unsere Aufmerksamkeit auf sich zieht, sofort das Doppelauge für die Ferne einstellen und der Stelle zuwenden, wo uns das unokulare Bild erschien. Dabei schiebt sich das von uns beachtete nach rechts erschienene unokulare Bild des bezüglichen Außendinges mit dessen vorher unbeachtet gebliebenen zweiten unokularen zu einem einfachen binokularen Bilde zusammen, und während wir nun dieses betrachten, achten wir wieder nicht auf das jetzt entstandene Doppelbild der Marke oder Fliege.

Betrachten wir mit beiden Augen relativ fern gelegene Dinge, so geben die näheren unokularen Bilder, von denen das Analoge gilt wie für die unokularen Bilder ferner Dinge bei Betrachtung eines näheren. Auch hierbei können die unokularen Bilder wie durchsichtig erscheinen. Es möge dies noch an einem besonderen Beispiele erläutert werden.

Die scheinbare Durchsichtigkeit ungleichseitiger Doppelbilder. Bringt man zwischen sein Gesicht und eine in gewöhnlicher Sehweite befindliche Schrift einen 1—1,5 cm breiten schwarzen oder grauen Papierstreifen (s. Fig. 75), dessen Fläche rechtwinklig von der Medianebene

des Kopfes durchschnitten wird, so erscheint der Streifen in Doppelbildern, welche bei passender Entfernung desselben von der Schrift weit genug voneinander abliegen, um einen Mittelteil der Schriftfläche beiden Augen sichtbar zu lassen. Diesem Teile entspricht in Fig. 75 die mit b_m bezeichnete Strecke. Nach links und rechts von diesem binokular lesbaren Teile der Schrift erscheint dann je eines der Doppelbilder (u_l und u_r), dessen Ränder man wahrnimmt, während durch seine Fläche hindurch die nur unokular ab-

Fig. 75.

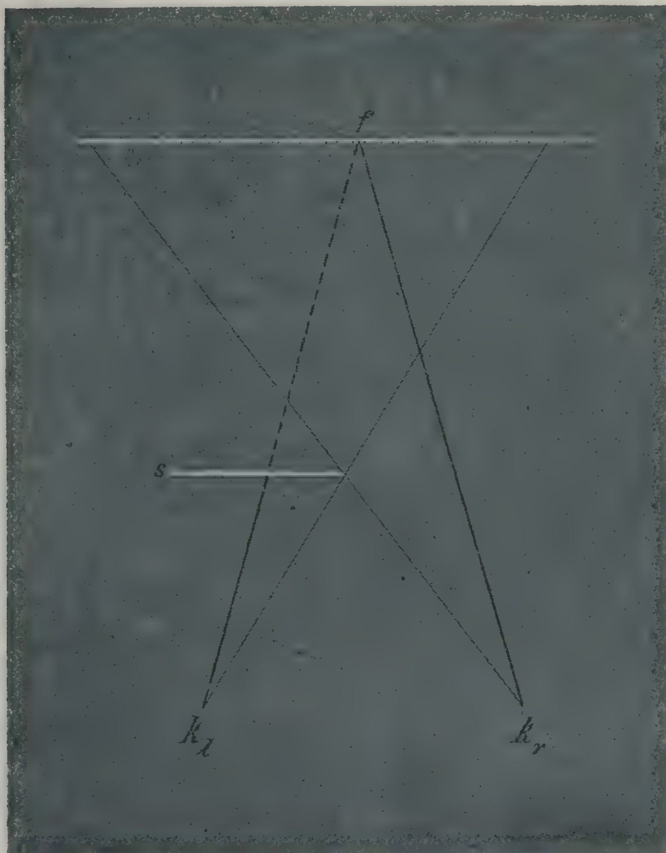
gebildete Schrift ebenfalls ganz deutlich sichtbar ist, als ob man sie durch eine schmale Glasplatte hindurch sähe. Noch weiter nach links und rechts erscheint wieder ein binokular sichtbarer Teil der Schriftfläche (b und b). Man kann, ohne durch das Doppelbild gehindert zu sein, die ganze Schrift lesen, und der nicht Unterrichtete bemerkt dabei nicht, dass er, während sein Blick eine Zeile durchmisst, die Schrift anfangs binokular, dann nur mit dem linken Auge, hierauf wieder binokular, dann nur mit dem rechten Auge und schließlich abermals binokular liest.

Der Durchschnittspunkt der Gesichtslinien bleibt, während man auf diese Weise eine Zeile abwechselnd binokular und unokular liest, bei nor-

malen Augen und normaler Kopfhaltung auch während der Zeit des nur unokularen Lesens auf der Schriftfläche.

Wenn man seinen Blick entlang einer Linie bewegt, so gleitet er nicht stetig auf derselben hin, sondern legt seinen Weg sprungweise zurück. Ebenso verhält es sich beim Lesen einer Schriftzeile. Während jedes Sprunges kann man wegen der Geschwindigkeit, mit der sich dabei das Bild auf der Netzhaut verschiebt, nichts unterscheiden. Erst wenn nach vollführtem Sprunge das Auge während ganz kurzer Zeit still steht, erkennt

Fig. 76.



man die einzelnen Wortbilder. Je bekannter uns die Schrift und die Sprache ist, desto größer ist unter sonst gleichen Umständen die Sprungweite und desto kleiner die Zahl der Sprünge, die der Blick zur Durchmessung einer Zeile nötig hat. Infolge der sprungweisen Blickbewegung hindert es uns selbst bei Benutzung eines schwarzen Papierstreifens nicht beim Lesen, dass da, wo die Grenzlinie eines Doppelbildes das Bild eines Buchstabens durchschneidet, die Grenzfarbe des Doppelbildes die weiße Umgebung des Buchstabens zuweilen sehr merklich verdunkelt. Denn nur zufällig kann es vorkommen, dass der Blick eine solche Stelle als vorübergehenden Ruhe-

punkt wählt. Wenn wir aber absichtlich den Blick auf einer Stelle ruhen lassen, wo die Grenzlinien eines schwarzen Buchstabens und die Grenzlinie eines Doppelbildes sich durchkreuzen, so bemerken wir nicht nur, dass zuweilen in dem ganzen, durch das Doppelbild hindurch gesehenen Buchstabengebiete das weiße Papier etwas verdunkelt erscheint, und dass dies in der Nähe der Grenze des Doppelbildes fast immer der Fall ist, sondern wir bemerken auch, dass im Wettstreit der weißen Grenzfarbe der Buchstaben mit der dunklen Grenzfarbe des Doppelbildes bald die eine, bald die andere das Übergewicht erhält.

Benutzen wir statt des grauen oder schwarzen Papierstreifens einen steifen, ganz ebenen weißen Streifen, so lässt sich derselbe so gegen das durch ein Fenster einfallende Himmelslicht neigen, dass seine Farbe der Farbe des bedruckten oder beschriebenen Papieres ganz gleich erscheint. Dann ist günstigenfalls die Grenze des Doppelbildes gar nicht bemerkbar und der nur mit einem Auge gesehene Teil der Schrift erscheint uns dann ganz ebenso wie der dicht daneben befindliche binokular gesehene. Wir haben dann wieder den in § 51 besprochenen Fall vor uns, wo kleine, unokular gesehene schwarze Felder, d. s. hier die Buchstaben, sich mit einer unokular gesehenen, nichts Unterscheidbares enthaltenden Fläche decken, deren Farbe die gleiche ist wie die der Umgebung der kleinen Felder.

§ 55. Der »paradoxe Versuch« Fechners. Beim binokularen Lesen einer Druckschrift auf weißem Papier erhalten beide Netzhäute fast vollkommen kongruente, auf korrespondierenden Stellen liegende und in allen Einzelheiten gleich lichtstarke Bilder. Im binokularen Bilde mischt sich also das beiderseitige gleiche Schwarz der Buchstaben wieder zu demselben Schwarz, das beiderseitige Weiß des Grundes wieder zu demselben Weiß. Bringe ich vor das eine Auge ein möglichst reines graues Rauchglas, welches nur einen passend kleinen Bruchteil des auffallenden Lichtes durchlässt, so wird dadurch das binokulare Lesen nicht wesentlich gestört. Schließe ich sodann das hinter dem Glase befindliche Auge oder verdecke ich noch besser Glas und Auge mit einem kleinen, ganz undurchsichtigen Schirm, so erscheint sofort das Papier heller, obwohl jetzt das eine Auge völlig verfinstert ist und nur das andere noch Licht empfängt. Fechner, der analoge Versuche zuerst anstellte, fand dies paradox, weil er an eine Summation der gleichzeitigen Erregungen beider Augen geglaubt hatte, und er nahm für den vorliegenden Fall eine antagonistische Beziehung zwischen beiden Augen derart an, dass unter Umständen die Erregung des einen Auges die gleichzeitige des anderen herabzusetzen vermöge. Nach den Erfahrungen aber, die wir in diesem Abschnitt über die binokulare Mischung tonfreier Farben gemacht haben, erscheint das Ergebnis des obigen Ver-

suches nicht nur nicht paradox, sondern ganz im Einklang mit jenen Erfahrungen. Solange man nämlich durch das Rauchglas die Schrift betrachtet, mischen sich, weil die unokularen Bilder der Buchstaben sich decken, überall die Buchstabenfarben unter sich und die Farben des Grundes unter sich, und da insbesondere das unokulare Bild des weißen Grundes im Sehfelde des bewaffneten Auges eine minder helle Farbe hat als im Sehfelde des anderen Auges, so geht aus der Mischung beider ein minder helles Weiß des Grundes hervor als das Weiß im Sehfelde des unbewaffneten Auges. Verfinstere ich jetzt das eine Auge völlig, so tritt im Sehfelde des verfinsterten Auges an die Stelle eines mannigfach differenzierten Bildes die Eigenfarbe dieses Auges, während im Sehfelde des offenen das differenzierte Bild mit seinen Grenzfarben fortbesteht. Für die binokulare Farbenmischung kommt aber die fast homogene Farbe im Sehfelde des verfinsterten Auges in ebenso geringem Maße in Betracht, wie wenn wir, statt das Auge zu verfinstern, ihm eine homogene, beliebig, aber gleichmäßig belichtete Fläche dargeboten hätten (vgl. § 51). Die Folge ist, dass jetzt im binokularen Bilde die Helligkeit des vom offenen Auge gesehenen Weiß des Grundes nicht mehr durch die Zumischung der durch das Rauchglas verdunkelten Farbe des anderen Sehfeldes herabgemindert wird.

Allerdings muss sich infolge der völligen Verfinsterung der zuvor schwach belichtet gewesenen Netzhaut des einen Auges die Pupille des offen gebliebenen etwas erweitern und also seine Netzhaut etwas stärker belichtet werden. Doch hat schon Fechner gezeigt, dass der Versuch auch dann noch mit entschiedenem Erfolge gelingt, wenn man den Einfluss der Pupillenänderung durch ein dicht vor das Auge gehaltenes Schirmchen mit zureichend kleiner Öffnung ausschließt.

Die Gestaltung des Sehfeldes bei völliger Verfinsterung des mit dem Rauchglase versehenen Auges beschränkt sich übrigens nicht auf die zwischen den Buchstaben und Zeilen gelegenen und deshalb den Grenzlinien der Buchstaben nahen Stellen, sondern auch auf größeren buchstabenfreien Stellen ist eine Aufhellung zu bemerken. Soweit dieselbe sich nicht auf die eben besprochene Erweiterung der Pupille zurückführen lässt, ist zu bedenken, dass das Gewicht der einem offenen Auge erscheinenden Farben viel größer ist, als das Gewicht der Eigenfarbe des verfinsterten Auges (vgl. § 24), und dass auch die buchstabenfreien Stellen fast nie ganz homogen erscheinen. Dies kann seinen Grund sowohl in einer nicht ganz homogenen Beschaffenheit der Papierfläche als auch in den sogenannten Mouches volantes des Auges haben, insoweit dieselben wirklich bewegliche sind; denn für die fixen entoptischen Figuren adaptiert sich das Auge sehr schnell, wie später zu erörtern sein wird.

Man schiebe bei binokularer Betrachtung eines bedruckten Blattes von der linken Seite her zwischen Gesicht und Papier ein steifes weißes und

ganz ebenes Papier so weit vor, dass dem linken Auge der ganze bedruckte Teil des Blattes verdeckt wird, während er dem rechten Auge sichtbar bleibt, wie dies Fig. 76 anschaulich macht. Neigt man dann das vorgeschobene Papier so gegen das einfallende Licht, dass sein Weiß genau ebenso hell erscheint, wie das Weiß des bedruckten Blattes, so erscheint die jetzt nur vom rechten Auge gesehene Schrift nicht merklich verändert, höchstens können die Buchstaben eine Spur weniger tiefschwarz erscheinen, als beim binokularen Lesen. Es liegt hier der auf S. 254 erörterte Fall vor. Auch wenn man die Lage des vorgeschobenen Papieres so verändert, dass es lichtschwächer wird, oder wenn man statt des weißen ein graues oder schwarzes Papier vorschiebt, verliert die Schrift nicht merklich an Deutlichkeit. Die vollständige Verfinsterung des linken Auges ist also nur ein Grenzfall; das Wesentliche ist hier die homogene Beleuchtung der linken Netzhaut, während die rechte das differenzierte Bild des bedruckten Blattes enthält.

Es lässt sich also durch eine ganz homogene Beleuchtung der Netzhaut des einen Auges seine Beteiligung am Inhalte des binokularen Sehfeldes in ähnlicher Weise ausschließen, als wie durch seine völlige Verfinsterung.

Zwischen der ganz homogenen Belichtung der linken Netzhaut und dem bei bester Akkommodation möglichst stark differenzierten Netzhautbilde eines mit schwarzen Buchstaben bedruckten Papieres giebt es alle denkbaren Zwischenstufen. Man kann durch Vorsetzen eines sehr dunklen Rauchglases das Netzhautbild so lichtschwach und den Lichtstärkenunterschied zwischen Buchstaben und Grund so klein machen, dass man die Buchstaben nur noch schwer zu unterscheiden vermag. Dann hat das linke unokulare Sehfeld einen fast ebenso minimalen Anteil am binokularen Bilde, wie wenn ersteres gar nicht differenziert, sondern die Netzhaut ganz homogen sehr schwach beleuchtet wäre. Die völlige Verfinsterung des linken Auges ändert dann nichts Merkliches am binokularen Bilde. Benutzt man weniger dunkle Rauchgläser, so kommt man zu einer Stufe der Lichtabsorption, bei der die Differenzierung im linksäugigen Sehfelde soweit deutlich wird, dass die völlige Verfinsterung des linken Auges bereits eine schwache Erhellung des binokularen Sehfeldes herbeiführt, wie sie der Fechner'sche Versuch zeigte. Diese Erhellung ist bei einem bestimmten Ausmaße der Absorption durch das Rauchglas am deutlichsten, um wieder abzunehmen, wenn diese Absorption zu gering wird und sich die Lichstärke des linksseitigen Netzhautbildes der des rechtsseitigen zu sehr nähert. Denn die unokularen Farben jedes Deckstellenpaares sind dann einander bereits so ähnlich, dass ihre Mischung eine binokulare Farbe ergiebt, deren Unterschied von der einen wie von der andern unokularen Farbe zu klein ist, um deutlich wahrgenommen zu werden.

IX. Abschnitt[1]).

§ 56. Die Geschwindigkeit der Wertigkeitsänderung der Sehsubstanz als physisches Korrelat der tonfreien Farben und Helligkeiten. Schon in § 23 (S. 104) wurde auseinander gesetzt, wie das Überwiegen der Dissimilation über die Assimilation ($D > A$) eine absteigende, der umgekehrte Fall ($D < A$) eine aufsteigende Änderung der Wertigkeit der Sehsubstanz um so mehr mit sich bringt, je größer der Unterschied $D - A$ ist, während bei gleicher Größe der beiden Teilprozesse des Stoffwechsels ($D = A$) die Wertigkeit, gleichviel auf welcher Stufe sie eben steht, keine Änderung erfährt. Wie in diesem besonderen Falle der gleichen Größe beider Prozesse die Summe derselben ($D + A$) sehr verschieden sein kann, so kann auch für den gewöhnlichen Fall der ungleichen Größe ($D \gtrless A$) ihre Summe ($D + A$) verschieden sein. Demnach ist die Geschwindigkeit der Wertigkeitsänderung einerseits von dem positiven oder negativen Werte des durch $D - A$ ausgedrückten Unterschiedes, anderseits von der Größe der gleichzeitigen Dissimilation und Assimilation abhängig. Ein und derselbe Unterschiedswert der beiden Prozesse bedeutet also für die Änderung der Wertigkeit der Sehsubstanz um so weniger, je größer jeder der beiden Prozesse und also auch $D + A$ ist, und um die Geschwindigkeit auszudrücken, mit welcher sich die Wertigkeit bei einem bestimmten Werte von $D - A$ ändert, müssen wir den Wert von $D - A$ zur gleichzeitigen Größe der beiden Prozesse in Beziehung setzen. Dies geschieht, wenn wir die Geschwindigkeit der Änderung durch $\frac{D - A}{D + A}$ ausdrücken.

---

1) Nach Ewald Hering's Tode wurden mir die auf seine Grundzüge der Lehre vom Lichtsinne bezüglichen Aufzeichnungen aus dem Nachlasse der Sichtung übergeben. Wohl fand sich ein reiches, wertvolles Material an Beobachtungen, Messungen und Entwürfen, aber leider nicht Vieles, das ich im Sinne des Verstorbenen als druckfertig ansprechen durfte.

Auch für das hier Veröffentlichte ist anzunehmen, daß er, der sich bei der Darstellung nicht genug tun konnte und immer wieder verwarf, besserte und ergänzte, während der Drucklegung noch manches anders gefaßt haben würde. Ich selbst habe mich zu irgend nennenswerten Änderungen nicht für befugt gehalten. —

Dürfen wir also an das, was Ewald Hering ungedruckt hinterlassen hat, nicht den Maßstab anlegen, wie an ein abgeschlossenes Werk, so werden doch die hier folgenden Abschnitte auch als Bruchstück Allen willkommen sein, die seine seltene Gabe zu würdigen wissen, frei von vorgefaßter Meinung anscheinend längst erledigte und geklärte Probleme von ganz neuen Seiten in Angriff zu nehmen und so nach den verschiedensten Richtungen anregend, fördernd und klärend zu wirken. C. Hess.

Ist im besonderen Falle $D = A$ und also $D - A = O$, so ist, wie gesagt, auch die Änderungsgeschwindigkeit gleich Null, d. h. die Wertigkeit der Sehsubstanz bleibt dabei ungeändert; dem entspricht im psychischen Sehfelde das mittlere Grau von der Helligkeit 0,5 (vgl. § 22 S. 102). Ist $D > A$, so ist $D - A$ eine positive Größe, und $\frac{D - A}{D + A}$ drückt dann die Geschwindigkeit der dabei stattfindenden absteigenden Änderung aus. Je größer diese Geschwindigkeit, desto heller ist die tonfreie Farbe, desto näher kommt sie der Helligkeit 1, d. h. dem absoluten Weiß. Ist dagegen $D < A$ und hat also $D - A$ einen negativen Wert, so drückt $\frac{D - A}{D + A}$ die Geschwindigkeit der aufsteigenden Änderung aus. Je größer diese Geschwindigkeit, desto größer ist die Dunkelheit der Farbe und desto kleiner ihre Helligkeit, desto mehr nähert sich letztere dem Nullwert und die Farbe dem absoluten Schwarz.

Jeder einzelnen Farbe der schwarz-weißen Farbenreihe entspricht also eine ganz bestimmte Geschwindigkeit der ab- oder aufsteigenden Wertigkeitsänderung, und ebenso wie durch das Größenverhältnis zwischen Dissimilation und Assimilation ($D : A$) lässt sich der Helligkeitsgrad der tonfreien Farbe durch die Geschwindigkeit kennzeichnen, mit welcher sich dabei die Sehsubstanz in ab- oder aufsteigender Richtung ändert. Der einen Hälfte der schwarz-weißen oder tonfreien Farbenreihe entsprechen als somatische Korrelate die verschiedenen Geschwindigkeiten der absteigenden, der anderen Hälfte die der aufsteigenden Änderung der Sehsubstanz.

Wir vermögen hiernach lediglich aus der Helligkeitsverschiedenheit zweier Sehfeldstellen zu erschließen, daß im somatischen Sehfelde der helleren Stelle eine schnellere Abnahme bzw. langsamere Zunahme der Wertigkeit der Sehsubstanz entspricht als der minderhellen, während gleiche Helligkeit zweier Stellen uns lehrt, daß im somatischen Sehfelde die Geschwindigkeit der ab- oder aufsteigenden Wertigkeitsänderung beiderseits gleich ist. Über die jeweilige Größe der Prozesse an den beiden Stellen aber sagen uns ihre Helligkeiten nichts aus. Denn zwei nebeneinander befindliche Stellen des Gesichtsfeldes können uns gleich hell oder gleich dunkel erscheinen, obwohl an den korrelativen Stellen des somatischen Sehfeldes die beiden Dissimilationen unter sich und die beiden Assimilationen unter sich verschiedene Größe haben, wenn nur das Verhältnis zwischen D u. A an beiden Stellen das gleiche ist; und anderseits können die beiden Stellen ungleich hell oder ungleich dunkel erscheinen, obgleich sowohl die beiden Dissimilationen als die beiden Assimilationen je unter sich gleich groß sind.

§ 57. Die terminalen Strahlungen. Man denkt sich bekanntlich die von den sichtbaren Außendingen in unser Auge gelangenden Strahlungen aus unzähligen einfachen Strahlungen von verschiedener Schwingungszahl bzw. Wellenlänge und von verschiedener Energie zusammengesetzt (vgl. Abschn. I § 2 S. 4). Ein solches Strahlgemisch erleidet nun auf seinem Wege von der Hornhaut bis zu der aus den Sehzellen bestehenden Empfangsschicht der Netzhaut mannigfache Änderungen, ehe es auf die Sehzellen, d. h. auf die Zapfen und Stäbchen wirken kann. Warum wir annehmen müssen, daß die Sehzellen und insbesondere deren Außenglieder der Ort sind, wo die Strahlungen erst zu einem Reiz für die Sehnervenfasern werden, ist im Anhang zu Kap. XII von S. Garten auseinandergesetzt. Unter Vermittlung der Sehzellen erhalten also die Strahlungen erst einen optischen Reizwert, und deshalb ist es für alles Weitere von grundlegender Bedeutung, die wesentlichsten Änderungen festzustellen, denen diese Strahlungen auf dem Wege von der Hornhaut bis zur entscheidenden Stelle unterworfen sind. Da nur die in die Empfangsschicht gelangten Strahlungen für unsere Gesichtswahrnehmungen von Bedeutung sind, so habe ich dieselben zum Unterschiede von den in die Hornhaut eintretenden als die terminalen Strahlungen bezeichnet. In demselben Sinne habe ich das terminale Spektrum eines Strahlgemisches von demjenigen Spektrum unterschieden, welches von dem entsprechenden Strahlgemisch vor seinem Eintritt ins Auge erzeugt wird.

Der Bruchteil, um welchen die Energie einer einfachen Strahlung auf dem Wege bis zu den Außengliedern der Zapfen und Stäbchen vermindert wird, ist keineswegs für alle Strahlungen eines Strahlgemisches derselbe, daher ändern sich in zusammengesetzten Strahlungen auch die Verhältnisse zwischen den Energien der einfachen Strahlungen, aus denen das Strahlgemisch besteht. Eine Veränderung dieses Mischungsverhältnisses bedingt aber, wie wir sehen werden, zugleich eine Änderung des aus den einzelnen Reizwerten der einfachen Strahlungen resultierenden Gesamtreizwertes des Strahlgemisches.

Dem Energieverluste, den eine Strahlung durch Absorption erfährt, entspricht, wie wir uns vorstellen, eine von der Strahlung geleistete Arbeit, d. h. die Summe sogenannter thermischer, chemischer oder sonstwelcher von der Strahlung geleisteter Arbeit. Insoweit die Strahlung optisch wirkt, handelt es sich um die von ihr im Empfänger geleistete chemische Arbeit.

Hornhaut, Linse und Glaskörper absorbieren als wasserreiche Medien ähnlich wie bloßes Wasser, daher es sich fragt, ob unser Unvermögen, die sogenannten ultraroten Strahlen des Spektrums wahrzunehmen, nur darauf beruht, daß sie durch Absorption zu sehr geschwächt werden, um noch wahrnehmbar zu sein, oder ob Strahlen von so großer Wellenlänge

für das Sehorgan überhaupt keinen optischen Reizwert besitzen. Letzterenfalls würden sie auch dann unsichtbar bleiben müssen, wenn sie auf ihrem Wege bis zu den Sehzellen gar keinen Verlust erhalten hätten. Ob die ultravioletten Strahlen des Spektrums, wenn sie ungeschwächt bis in die Sehzellen gelangen könnten, uns auch dann noch gänzlich unsichtbar bleiben müßten, ist ebensowenig zu entscheiden; denn auch diese ultravioletten Strahlen erfahren auf dem Wege bis zu den Außengliedern der Sehzellen individuell verschieden große Energieverluste.

Durch die schon beim Neugeborenen etwas grünliche, beim Erwachsenen gelb bis braun erscheinende Linse sind individuell verschieden große Energieverluste der violett wirkenden Strahlen bedingt; die nachgewiesene Fluoreszenz der Hornhaut, der Linse und der Außenglieder der Sehzellen kommt auf Kosten der fluoreszierend wirkenden Strahlungen zustande und endlich absorbiert der gelbe Fleck, welcher wie ein gelber Schirm der Sehzellenschicht vorgelagert ist, wenigstens für den zentralen Teil die violetten Strahlen.

Ob, wenn diese Energieverluste der violett wirkenden Strahlen nicht vorhanden wären, die ultravioletten Strahlen noch einen optischen Reizwert haben würden, läßt sich also ebensowenig wie beim Ultrarot sagen.

Für unsere weiteren Eröterungen kommen jedoch weder ultrarote noch ultraviolette Strahlen in Betracht, sondern die Reizwerte derjenigen, welche zwischen dem jeweiligen sichtbaren Anfang und Ende eines gegebenen Spektrums liegen. Diese unterliegen, ehe sie bis zu den Sehzellen gelangen, der selektiven Absorption seitens der beim Menschen mehr oder weniger auffallend gefärbten Linse bzw. auch noch des gelben Farbstoffes der Macula lutea, worauf ich schon im Jahre 1885 in einer Abhandlung über individuelle Verschiedenheiten des Farbensinnes nachdrücklich hingewiesen habe. Die dadurch bedingten Energieverluste der bezüglichen Strahlen sind zwar individuell verschieden, zuweilen aber höchst bedeutend.

Es sei mir gestattet, aus der soeben zitierten Abhandlung einige Sätze wörtlich anzuführen, in denen ich Ergebnisse meiner damaligen Untersuchungen kurz zusammenfaßte.

»Die Färbung der Linse ist also eine ganz allgemeine und konstante Erscheinung. An den Linsen der Neugeborenen macht sich nur erst die Absorption der violetten Strahlen bemerklich, daher die grüngelbe Farbe. Je mehr die Pigmentierung zunimmt, desto mehr fällt der Verlust auch der blauen und grünblauen Strahlen ins Gewicht, die Linse erscheint rein gelb. Endlich wird auch die Absorption der grünen Strahlen merklich und die Linse nimmt eine rotgelbe Färbung an« .... »Von der Makula konnte ich bei Neugeborenen (deren Alter 4 Wochen nie überschritt) nur bisweilen eine Andeutung bemerken. Vielleicht wurde sie durch die Trübung der Netzhaut verdeckt, denn Max Schultze (s. u.) gibt an, in der Netzhaut eines während der Geburt gestorbenen, reifen Kindes einen gelblichen Anflug unter dem Mikroskop gesehen zu haben« ...

»Schon Max Schultze betonte[1]) die großen individuellen Verschiedenheiten der Makula und suchte daraus Verschiedenheiten des Farbensinnes zu erklären«.

Die Behauptung, daß die Macula lutea während des Lebens gar nicht vorhanden, sondern nur eine Leichenerscheinung sei, läßt sich leicht widerlegen, wie später ausführlich geschehen wird.

Die Farbe der menschlichen Linse hat C. Hess im Archiv für Augenheilkunde (Bd. 61, 63 u. 64. 1908 u. 1909) eingehender Untersuchung unterzogen und unter anderem gezeigt, daß die gelbe Färbung derselben ohne störende Beeinträchtigung ihrer Durchsichtigkeit genügend hohe Grade erreichen kann, um durch Absorption vollständige »Blaublindheit« des Auges herbeizuführen. Derselbe hat dort auch messende Bestimmungen der Energieverluste gemacht, welche gewisse Strahlungen beim Durchgange durch die Linse erleiden und insbesondere in seiner zweiten Abhandlung (Bd. 63 S. 165) eine treffliche Methode angegeben, um die Linsenfärbung in ihrem Einflusse auf das Farbensehen nicht nur an solchen Ausnahmefällen mit tiefdunkler Linse nachzuweisen, sondern ihr Verhalten auch unter gewöhnlichen physiologischen Verhältnissen und in verschiedenen Lebensaltern genauer zu verfolgen und sie messend zu bestimmen. Er zeigte so z. B., daß vielfach schon zwischen dem 20.—30. Jahre $^1/_4$ der zu den Versuchen benützten blauen Strahlen in den normalen Linsen absorbiert wird; jenseits des 50. Jahres wird in der Regel mehr, zum Teil viel mehr als die Hälfte dieser Strahlen in der Linse zurückgehalten.

§ 58. Zum Verständnis der Anpassungen des Auges an die jeweilige Beleuchtung ist eine genaue Kenntnis der Art, wie die Augen sich beim Betrachten der Außendinge bewegen, unerläßlich. Beim gewöhnlichen Sehen ändert der Blickpunkt unaufhörlich seinen Ort im Gesichtsfelde; denn wir richten die Augen in raschem Wechsel bald auf diese, bald auf jene Stelle der Außenwelt. Dabei bewegen sich die Augen mit großer Geschwindigkeit aus einer Stellung in die andere, und entsprechend verschiebt sich das Bild der Außendinge so geschwind auf der Netzhaut, daß es unmöglich wird, während dieser Verschiebung etwas deutlich zu sehen. Dies wird erst durch einen, wenn auch nur kurzen Stillstand des Bildes auf der Netzhaut möglich.

Andererseits kann es bei offenen Augen zu ungewöhnlich lange festliegenden Netzhautbildern kommen, ohne daß man eigentlich etwas sieht, wenn man in Gedanken versunken die optische Außenwelt gar nicht beachtet oder auch gedankenlos vor sich hinstarrt. Wer mit gespannter Aufmerksamkeit auf ein schwaches Geräusch lauscht oder in einem Konzerte

1) Über den gelben Fleck der Retina. Bonn 1866.

nur auf die Musik achtet und, wie man zu sagen pflegt »ganz Ohr ist«, dessen Augen stehen still oder er hält sie geschlossen.

Die Augenbewegungen sind also beim gewöhnlichen Sehen sprunghaft und keineswegs stetig verlaufend, wie man sie sich einst dachte. Meist ohne länger als einen kleinen Bruchteil einer Sekunde auf einem Punkte zu verweilen macht z. B. beim Lesen unser Blick in rascher Wiederholung kleine Sprünge nach rechts, und wenn die Zeile zu Ende geht, einen großen Sprung nach links und, falls er sein Ziel dabei nicht sogleich erreicht, noch einen kleinen Nachsprung.

Ganz ähnlich verhält es sich überhaupt immer dann, wenn man die Außendinge aufmerksam betrachtet, um sie genauer kennen zu lernen. »Ein mehr oder minder indirekt gesehenes Objekt zieht«, wie ich einst sagte[1]), »unwillkürlich unsere Aufmerksamkeit auf sich oder wird von vorn herein willkürlich zum Gegenstande derselben gemacht. Hierdurch wird dieses zunächst indirekt gesehene Objekt zum Zielpunkte einer Bewegung der Augen, welche sozusagen ganz von selbst der Ortsveränderung der Aufmerksamkeit folgen. Die Bewegung selbst erfolgt sehr rasch und sozusagen in einem Sprunge. Entsprechend rasch gleiten die Netzhautbilder über die Netzhaut, viel zu rasch, um eine Unterscheidung der bezüglichen Objekte zu gestatten. Tatsächlich unterscheidet man dieselben nur vor Beginn und gegen Ende oder nach Ende der Bewegung, im indirekten oder direkten Sehen. Gibt man sich Mühe, die zwischen dem Ausgangs- und Endpunkt einer Blickbahn gelegenen Dinge zu unterscheiden, so hat das lediglich zur Folge, daß man statt eines großen Blicksprungs eine Reihe kleinerer ausführt. Hiervon überzeugt man sich sehr leicht, wenn man sich ein kleines sehr deutliches Nachbild auf der Stelle des direkten Sehens erzeugt. Da dasselbe auf der Netzhaut festliegt, so erscheint es uns immer dort, wo wir eben hinsehen. Ich bin nicht imstande, den Blick mit einer beliebigen, ganz gleichmäßigen Langsamkeit über eine bedruckte oder unbedruckte Seite hinwegzuführen; immer geht der Blick sprungweise vorwärts«. Wir entnehmen bei diesem sprungweisen Sehen unserem jeweiligen Gesichtsfelde eine Menge von Stichproben, aus denen wir uns ein Gesamtbild desselben aufbauen; mit der Zahl dieser Proben wächst die Genauigkeit der optischen Wahrnehmung der Außendinge.

Eine stetige Drehung der Augen läßt sich am einfachsten dadurch erzielen, daß man während fester Fixierung eines Punktes den Kopf langsam nach rechts oder links, nach oben oder unten wendet. Dabei drehen sich die Augen, der Kopfdrehung entgegengesetzt, in ihren Höhlen. Ein dauerhaftes Nachbild gestattet auch hier, das Verhalten der Augen zu kontrollieren.

---

1) Über Ermüdung und Erholung des Sehorgans. v. Graefes Arch. f. Ophth. XXVII, 3. S. 20.

Diese Angaben stützen sich auf Beobachtungen, die ich bereits im Jahre 1879[1]) bei einer Untersuchung der Muskelgeräusche des Auges gemacht und seitdem vielfach zum Teil mit verbesserter Methode wiederholt habe. Die Augenmuskeln erzeugen ebenso wie jeder andere Muskel während ihrer Tätigkeit Geräusche, welche man deutlich zu hören vermag. Man verbindet einen dünnen Kautschukschlauch einerseits mit einem kleinen Schalltrichter, dessen äußere Öffnung beiläufig 4 mm im Durchmesser hat, andererseits mit einer durchbohrten sogenannten Olive, welche man in den äußeren Gehörgang so einbringt, daß sie der Haut desselben ringsum dicht anliegt. Während beide Augen geöffnet sind und der musculus orbicularis oculi beiderseits völlig erschlafft ist, setzt man den Schalltrichter auf das obere oder untere Lid, was sich bei nicht zu tief liegenden Augen leicht tun läßt.

Der genannte Muskel gibt, wenn man das Auge absichtlich schließt, ein so starkes schwirrendes Geräusch, daß die Geräusche der eigentlichen Augenmuskeln übertönt werden. Auch wenn man nur das nicht behorchte andere Auge zukneift, erschlafft infolge assoziierter Innervation der Schließmuskel des behorchten nie vollständig und gibt noch ein störendes Geräusch. Sind aber beide Muskeln völlig erschlafft, so hört man bei festem Fixieren eines Außenpunktes noch immer ein stetig anhaltendes, scheinbar aus größerer Entfernung kommendes Rauschen. Dieses D a u e r g e r ä u s c h, wie ich es benannte, ist durch andauernde Innervation von Augenmuskeln bedingt und kommt für das Folgende nicht in Betracht[2]).

»Während man dasselbe beobachtet, hört man nämlich zwischendurch ganz kurze, dumpf klappende Geräusche, welche sich mit unregelmäßigen Intervallen folgen. Anfangs überhört man dieselben leicht, weil man seine Aufmerksamkeit zu ausschließlich dem Dauergeräusche zuwendet. Diese M o m e n t a n g e r ä u s c h e, wie ich sie bezeichnen will, sind am besten den Herztönen zu vergleichen. Wenn man ein ganz unregelmäßig schlagendes Herz in einiger Entfernung von der Herzgegend auskultieren würde, so müßte man ganz ähnliche Schallempfindungen erhalten.

Die Momentangeräusche sind nachweisbar die Folge unabsichtlicher, ruckender Bewegungen des Augapfels. Man ist sich, während man seine Aufmerksamkeit dem Dauergeräusche zuwendet, gar nicht bewußt, wie unruhig dabei öfters die Augen sind, und insbesondere nicht des Umstandes, daß ihre Bewegungen ruckweise erfolgen. Fixiert man einen Punkt ganz

1) Über Muskelgeräusche des Auges. Sitzungsbericht der Wiener Akademie d. Wissensch. III. Abt. Febr. 1879.

2) Wie man Störungen vermeiden kann, welche durch die Tätigkeit am Knochengerüst des Kopfes angreifender Muskeln entstehen oder in einer Zuleitung von Muskelgeräuschen der Hand- und Armmuskeln durch die den Schalltrichter haltenden Finger begründet sind, habe ich am angegebenen Orte auseinandergesetzt.

fest, so verschwinden die Momentangeräusche, um erst wieder aufzutreten, sobald infolge der Ermüdung oder vorübergehender Unachtsamkeit wieder Bewegungen des Augapfels eintreten.

Der im Fixieren nicht sehr Geübte tut gut, sich ein langdauerndes Nachbild, z. B. von einer kleinen weißen Scheibe auf schwarzem Grunde, zu erzeugen und dann erst einen markierten Punkt auf einfarbigem Grunde zu fixieren: er wird sich dann überzeugen, daß jedem Momentangeräusche des Auges eine Verschiebung des Nachbildes entspricht. Ebenso bieten jene mouches volantes, welche durch Augenbewegungen in leichte wirkliche (nicht bloß scheinbare) Bewegungen versetzt werden, eine bequeme Kontrolle der erwähnten unabsichtlichen Blickschwankungen.

Sehr gut kann man die Momentangeräusche beim Lesen beobachten. Während der Blick die Zeile entlang scheinbar stetig gleitet, verraten die Momentangeräusche die ruckweise erfolgende Bewegung des Augapfels. Springt der Blick vom Ende der einen Zeile auf den Anfang der nächstfolgenden, so vernimmt man ein besonders deutliches Geräusch, welches aber etwas länger ist und im Gegensatze zu dem kurzen Klopfen, wie man es gewöhnlich hört, etwas Schabendes oder Reibendes hat; dasselbe verhält sich zu den sonstigen Momentangeräuschen etwa so, wie ein Herzgeräusch zu einem Herztone.«

Ich brauche z. B. zum aufmerksamen Lesen einer Zeile dieses Handbuches bei 20 cm Abstand meiner Augen vom Blatte durchschnittlich 3 Sekunden. Klebe ich aber eine Anzahl Blätter einer ganz gleichen Druckschrift parallel nebeneinander auf den horizontal liegenden Papierstreifen eines Kymographions, halte mit der Hand eine dünne Glasplatte dicht über den Papierstreifen, fixiere eine mit Schreibdiamant auf dem Glase angebrachte feine Marke ganz fest und lasse dann den Streifen mit 3 Sekunden Geschwindigkeit unter dem Glase vorübergleiten, so vermag ich auch bei bester Beleuchtung keinen Buchstaben zu erkennen, geschweige denn zu lesen. Beim gewöhnlichen Lesen verschieben sich die Buchstabenbilder noch schneller auf der Netzhaut, da ein Teil der Zeit zu den kurzen Stillständen des Auges während des Lesens verbraucht wird. Es versteht sich, daß je nach Form und Größe der Buchstaben, je nachdem ich an dieselben gewöhnt bin oder nicht und je nach der Verständlichkeit des Inhaltes einer Zeile die zum Lesen derselben nötige Zeit sehr verschieden sein kann.

§ 59. Anpassung des Auges an ständige Netzhautbilder. Unter ständigen Netzhautbildern verstehe ich die von den Strahlungen unbewegter Außendinge auf der Netzhaut eines ganz feststehenden Auges erzeugten Bilder. Auch wenn die von einem Außendinge zum Auge gelangenden optischen Strahlungen ganz unverändert bleiben und etwaige Änderungen der Akkommodation und der Pupille abgelaufen sind, kommt es nicht zu einer

Konstanz der Lichtempfindung, sondern letztere verändert sich stetig in ganz gesetzmäßiger Weise. Aus der großen Mannigfaltigkeit der auf diesen Änderungen beruhenden Tatsachen können hier nur einige wenige angeführt werden, welche sich unter möglichst einfachen Versuchsbedingungen und ohne ungewöhnliche experimentelle Hilfsmittel beobachten lassen.

Vor einem Tische sitzend habe man ein großes ganz ebenes und überall gleich weißes Blatt vor sich ausgebreitet, welches womöglich durch ein mäßig großes Fenster ohne dicke Fensterstäbe gut beleuchtet ist. Mit der einen Hand halte man in passender Höhe einen langen Bleistift horizontal über das Blatt, so daß er seinen Schatten auf die weiße Fläche wirft. Je nach dem Abstande des Bleistiftes vom Blatte sind die Ränder des Schattens mehr oder weniger verwaschen. Fixiert man nun anhaltend bei ruhig stehendem Kopfe einen neben dem Schatten mit Tinte markierten Punkt, so sieht man sehr bald zunächst die verwaschenen Ränder des Schattens verschwinden, während der übrige, dunklere Teil desselben sich aufhellt, bis unter zunehmender Aufhellung der ganze Schatten schließlich so vollständig verschwindet, daß die Stelle, auf der er lag, jetzt genau ebenso hell erscheint, wie das übrige Blatt. Das Verbleichen des Schattens und sein völliges Verschwinden tritt um so eher ein, je geringer seine Dunkelheit schon anfangs und je weiter die fixierte Marke vom Orte des Schattens entfernt war. Ist der Schatten verschwunden, so bleibt er es auch so lange, als man den Blick fixiert unverrückt festhält.

Es versteht sich, daß man durch Befestigung des Bleistiftes an einer kleinen mechanischen Hand und durch Benützung einer Kopfstütze störende Verschiebungen des Schattens oder des Kopfes während der Fixierung der Marke besser ausschließen kann, die um so leichter eintreten, je länger man fixieren muß. Die zum Verschwinden des Schattens nötige Zeit beträgt je nach dessen Dunkelheit und je nach der Lage der fixierten Marke relativ zum Schatten nur kleine Bruchteile einer Minute oder mehr als eine Minute. Letzteres gilt insbesondere für den Fall, daß der fixierte Punkt innerhalb des Schattens oder gar auf dessen dunkelstem Teile liegt. Ein zu dunkler Schatten läßt sich dann überhaupt nicht in seiner ganzen Länge zum Verschwinden bringen, weil die Augen schließlich zu schwanken beginnen; wohl aber können die vom fixierten Punkte weiter abliegenden Endstücke unsichtbar werden. Es kommt also wesentlich darauf an, wie weit das Netzhautbild des Schattenteils, um dessen Verschwinden es sich handelt, vom funktionellen Mittelpunkte der Netzhaut entfernt ist; je mehr dies der Fall, desto früher das Verschwinden.

Sobald der Schatten verschwunden ist, hat der zweite, nicht minder wichtige Teil des Versuches zu beginnen. Während man den gewählten Punkt noch weiter fixiert, entfernt man schnell den Bleistift so weit, daß er auf die Fläche keinen Schatten mehr wirft; anstatt des Schattens sieht

man jetzt einen hellen Streif auf dem Papier, der um so heller ist, je dunkler der Schatten war, und dessen Helligkeit sich von den Rändern ganz in derselben Weise abstuft und in das Weiß des Papieres verliert, wie anfangs die Dunkelheit des Schattens. Kurzum, der helle Streif verhält sich zum anfänglichen Schatten wie das Negativ der Photographie zum Positiv.

Bei dem soeben beschriebenen Versuche wurde eine auf weißer Fläche befindliche dunkle Stelle durch anhaltendes Fixieren zum Verschwinden gebracht; auf der hellen Fläche läßt sich aber auch durch Zuspiegelung von Licht ein Fleck erzeugen, der noch viel heller ist, als das Weiß des Papieres. Zu diesem Zwecke bringt man gegenüber dem Fenster einen kleinen Hohlspiegel in passender Höhe und Entfernung so an, daß er ein völlig verwaschenes Bild des Fensters auf der weißen Fläche entwirft, und verfährt mit diesem hellen Flecke ganz ebenso, wie zuvor mit dem Schatten. Je nach der mehr oder weniger großen Helligkeit des Fleckes und je nach der Lage des fixierten Punktes verschwindet nun früher oder später auch ein solcher heller Fleck spurlos. Verdeckt man dann rasch den Spiegel, so entsteht plötzlich an Stelle des verschwundenen hellen ein dunkler schattenähnlicher Fleck, der sich wieder zum anfangs gesehenen hellen Fleck angenähert ebenso verhält, wie ein photographisches Negativ zum Positiv.

Statt einer weißen kann man zu diesen Versuchen auch eine beliebig graue, ganz ebene und matte Fläche benutzen.

Immer hat man die Kopfhaltung so zu wählen, daß die Augen während des Fixierens möglichst wenig von der ihnen bequemsten Mittelstellung abzuweichen brauchen; auf diese Weise lassen sich die unwillkürlichen Blickschwankungen am leichtesten verhüten. Auch ist zu bedenken, daß bei langem Fixieren eines Punktes, wenn keinerlei Bewegungen im Gesichtsfelde die Aufmerksamkeit wach erhalten, die oberen Lider sich allmählich zu senken und eine teilweise Deckung der Pupille herbeizuführen pflegen, wodurch die vorausgesetzte Konstanz der Lichtstärke des Netzhautbildes vereitelt wird.

Auch scharf umrissene Teile des Gesichtsfeldes, z. B. einen scharf umgrenzten Schatten auf hellem Grunde oder einen ebensolchen hellen Streifen auf minder hellem Grunde würde man auf die beschriebene Weise zum Verschwinden bringen können, wenn sich jede, wenn auch nur minimale Blickschwankung beim Fixieren vermeiden ließe. Dies ist jedoch selbst dem Geübtesten um so weniger möglich, je länger das Fixieren schon gedauert hat. Infolgedessen verschiebt sich z. B. das Bild des Schattens auf der Netzhaut, einerseits wird eine schmale, bis dahin nur schwach bestrahlte Stelle der Netzhaut plötzlich stärker bestrahlt, andererseits wird eine stark bestrahlt gewesene schwächer bestrahlt, und weil für beide

Stellen bereits eine mehr oder weniger vorgeschrittene Anpassung erfolgt ist, gilt für den jetzt verschobenen Teil des Bildes ganz dasselbe, was für das ganze, nicht verschobene Netzhautbild gilt, wenn wir plötzlich den schattenwerfenden Stab entfernen.

Statt daß, wie im letzteren Falle, an Stelle des ganzen Schattens ein heller Streifen auf der weißen Fläche erscheint, zeigt sich jetzt nur ein hellerer Saum an der einen Seite des Schattens und gleichzeitig ein dunklerer an der anderen Seite desselben. Wäre zufällig einmal die unabsichtliche Verlagerung des Blickpunktes und die entsprechende Verschiebung des Netzhautbildes so groß, daß jetzt das ganze Bild des Schattens auf eine neue Netzhautstelle fiele, so würden am anfänglichen Orte des Schattens der erwähnte helle Streifen, das ist ein negatives Nachbild und gleichzeitig daneben der Schatten mit seiner anfänglichen Dunkelheit erscheinen. Eine so starke plötzliche Verschiebung des Blickes läßt sich nach längerem Fixieren absichtlich herbeiführen, wobei man sich von der Richtigkeit des eben Gesagten überzeugen kann. (Zur Vermeidung von Doppelbildern infolge von Konvergenzänderungen stellt man solche Versuche zweckmäßig unokular an).

Nur wenn die unabsichtliche kleine Verschiebung der Blickrichtung mit der Richtung der Mittellinie des Schattens zusammenfällt, und sein Bild sich auf der Netzhaut in sich selbst verschiebt, treten die beschriebenen Säume nicht auf.

An einem scharf umgrenzten runden Schatten oder auch an einem ebensolchen hellen Fleck, von dem ganz das Analoge wie von dem Schatten gilt, beobachtet man bei jeder beliebigen Richtung der unabsichtlichen Blickschwankung auf der einen Seite einen dunkleren, auf der anderen einen helleren sichel- oder halbmondförmigen Saum.

Auch das Bild eines verwaschen begrenzten Schattens oder lichten Fleckes verschiebt sich ein wenig während jeder unbeabsichtigten kleinen Blickschwankung auf der Netzhaut. Dies bleibt aber unbemerklich, weil dabei im Bezirke der Bildverschiebung nur minimale Änderungen der Belichtung stattfinden, welche unter der Schwelle der Wahrnehmbarkeit bleiben.

Wären wir also imstande, beim Fixieren eines Außenpunktes jede unabsichtliche Augenbewegung auszuschließen, so würde es zum Zwecke unserer Versuche genügen, auf die weiße Fläche einen Streifen oder eine Scheibe eines Papieres zu legen, das dunkler oder heller ist, als das Weiß der Fläche, um dieselben nach gebührender Zeit verschwinden bzw. nach rascher Beseitigung derselben ihr negatives Nachbild zu sehen. Ferner läßt sich erwarten, daß auch ein tiefschwarzes Papierstück auf weißem Grunde oder ein hellweißes auf schwarzem scheinbar verschwinden würde, wenn die Fixierung eines Punktes lange genug fortgesetzt werden könnte.

Wie überraschend schnell bei absolut fester Lage des Netzhautbildes kleine Felder desselben, die lichtschwächer sind als ihre Umgebung, unsichtbar werden können, lehrt uns die Purkinjesche Aderfigur. Ist auf der Empfangsschicht der Netzhaut eine relativ große, überall gleich lichtstarke Fläche abgebildet, so sind die hinter einem Netzhautgefäße liegenden Stellen schwächer belichtet als die übrigen Teile und wir würden dementsprechend, solange wir den Blick auf eine gleichmäßig und nicht zu stark belichtete Fläche richten, die bekannte Aderfigur deutlich sehen, wenn nicht sowohl die von den Gefäßen beschatteten Stellen als ihre ganze Umgebung sich ihrer Belichtung derart angepaßt hätten, daß die beschatteten Stellen in derselben Helligkeit erscheinen, wie ihre lichtstärkere Umgebung, und also unsichtbar geworden sind.

Die üblichen Methoden zur Sichtbarmachung der Gefäßschatten beruhen darauf, daß der Schatten auf andere Stellen der Empfangsschicht geschoben wird, die also an die schwächere Beleuchtung nicht angepaßt sind. Wirft man in bekannter Weise auf die temporale Hälfte der Sklera mittels einer starken Sammellinse das kleine Bildchen einer starken Lichtquelle, z. B. einer Bogenlampe, so kann man die Aderfigur bis in ihre feinsten Ausläufer sehen. Hält man dabei das Auge ganz ruhig und fest auf die Lichtquelle und die Linse gerichtet, dann verschwindet die ganze Figur trotz ihrer anfänglichen Schwärze schon nach wenigen Sekunden; so überraschend schnell adaptiert sich die den Schatten empfangende Stelle und ihre Umgebung an die Verschiedenheit ihrer Belichtung. Bewegt man jedoch das Auge, oder verschiebt man bei feststehendem Auge die Linse, so wird die jetzt auf nicht adaptierte Stellen fallende Schattenfigur sofort wieder sichtbar, während daneben die für dieselbe adaptiert gewesenen Stellen uns als ein helles negatives Nachbild der dunkleren Aderfigur erscheinen. Die Schatten der großen Gefäße können dann ganz ebenso wie wir dies an dem beschriebenen Bleistiftschatten fanden, einen leuchtend hellen Saum zeigen. Die Geschwindigkeit des Verschwindens erklärt sich hier aus der Schmalheit des Feldes.

Viel günstiger sind die Bedingungen für das durch Anpassung bewirkte scheinbare Verschwinden von Außendingen, wenn dieselben infolge zu schwacher Beleuchtung, wie z. B. bei Abend- oder Morgendämmerung schon von vornherein und ehe man einen Außenpunkt zu fixieren beginnt, nicht wie bei Tage, mit scharfen, sondern nur mit verschwommenen Umrissen erscheinen. Fixiert man unter solchen Umständen einen Punkt des Gesichtsfeldes, so werden die Umrisse der Außendinge zunehmend noch verschwommener, und sowohl die anfangs weiß als auch die schwarz erschienenen werden immer grauer, bis man endlich nur ein im ganzen Gesichtsfeld ausgebreitetes Grau von überall gleicher Helligkeit sieht.

Ist die Abenddämmerung soweit vorgeschritten, daß schon zahlreiche

Sterne sichtbar sind, ohne noch die funkelnde Helligkeit zu zeigen, wie in einer klaren Nacht, und behält man z. B. den hellsten der sichtbaren Sterne fest im Auge, so mindert sich die Zahl der gleichzeitig sichtbaren mehr und mehr, die schwächstleuchtenden und die der Peripherie des Gesichtsfeldes näherliegenden verschwinden zuerst, dann auch die helleren und weniger indirekt gesehenen, selbst der am hellsten gewesene fixierte Stern beginnt zu verbleichen und schließlich kann auch er, wenn der Blick nicht zu sehr zu schwanken beginnt, ganz verschwinden. Verlegt man absichtlich den Blickpunkt ein wenig, so werden alle Sterne sofort wieder sichtbar.

Dieses während der Abend- und Morgendämmerung vorkommende Verschwinden eines längere Zeit fixierten kleinen Außendinges infolge der Ständigkeit seines Netzhautbildes darf nicht verwechselt werden mit dem sogenannten »zentralen Verschwinden« kleiner Objekte bei allgemeiner Dunkeladaptation des ganzen somatischen Sehfeldes. Läßt man während einer solchen den Blick wie gewöhnlich umherwandern, so kann man beobachten, daß kleine Dinge von sehr geringer Lichtstärke zwar indirekt zu sehen sind, aber völlig verschwinden, sobald man den Blick auf sie richtet und ihr Netzhautbild auf die Stelle des direkten Sehens zu liegen kommt (vgl. § 38 S. 167).

Wenn sich an eine schwache Bestrahlung einer Netzhautstelle plötzlich eine starke anschließt oder umgekehrt, so tritt an der zugehörigen Stelle des Sehfeldes nicht genau in demselben Zeitpunkte, wo die Änderung der Belichtung erfolgt, auch schon ein entsprechend heller oder dunkler Fleck an den Platz des bisherigen, sondern zunächst ein, unter Umständen sogar sehr auffallender, sich außerordentlich geschwind wiederholender Wechsel zwischen dunkler und heller Farbe (vgl. § 38 S. 167), und man bekommt den Eindruck, als ob zwei antogonistische Kräfte miteinander in einem hin- und herwogenden Kampfe lägen, bis schließlich die eine oder andere siegreich wird. Die eine Kraft entspricht der Reizkraft oder optischen Valenz der Strahlung, die andere beruht, wie uns der VII. Abschnitt lehrt, auf der Induktion. Auch bei minder großen und minder rasch verlaufenden Intensitätsänderungen der Bestrahlung kann man bei gehöriger Aufmerksamkeit bemerken, daß der durch die Intensitätsänderung bedingten neuen Farbe oder Helligkeit wenigstens eine kurze gegensinnige Phase als eine Art Vorschlag vorangeht. Nur die dann dauernd ins Bewußtsein tretende Farbe, sei sie heller oder dunkler als die vorangegangene, kommt hier für uns in Betracht. (Daß auch sie trotzt der nun konstant bleibenden Belichtung sich im weiteren Verlaufe der Anpassung wieder ändert, wurde bereits erwähnt.)

Wenn man die Intensitätsänderung der Bestrahlung nicht plötzlich herstellt, sondern langsamer vollzieht und die Sehsubstanz also sozusagen nicht durch einen Stoß erschüttert, sondern vorsichtig in den neuen Zustand hineindrängt, so fallen die erwähnten Helligkeitsschwankungen fort.

Nach der auf- oder absteigend erfolgten Intensitätsänderung, dann konstant gebliebenen Belichtung einer Netzhautstelle vergeht bis zur Vollendung der Anpassung eine um so längere Zeit, je größer die Intensitätsänderung, d. h. ihr positiver oder negativer Zuwachs der Belichtung war. Das Zeichen der vollendeten Anpassung ist das völlige Verschwinden des Schattens oder hellen Fleckes, gleichviel ob wir die unterdes eingetretene schwächere gegensinnige Helligkeitsänderung der ganzen Fläche bemerkt haben oder nicht. Erfolgt schon vor vollendeter Anpassung eine neue Änderung der Belichtungsstärke, so schreitet entweder die Anpassung im Sinne der ersten Belichtung weiter fort, oder man sieht ein negatives Nachbild, welches aber jetzt schwächer entwickelt ist, als bei ungestörtem Fortgang der Anpassung an die frühere Stärke der Belichtung der Fall gewesen wäre.

Erklärung der Anpassung an ständige Netzhautbilder. Man hat, wie in § 25 (S. 112—115) gezeigt wurde, neben der Anpassung der Sehsubstanz als einer im strengen Sinne nervösen Substanz eine besondere Anpasssng des Empfängers der Netzhaut, d. h. der Stäbchen- und Zapfenschicht, in Betracht zu ziehen. (Dies gilt für die örtliche Anpassung der einzelnen Sehfeldstellen wie für die allgemeine Anpassung des ganzen Sehfeldes.)

Die Anpassung des Empfängers an gegebene konstante Bestrahlung ist vollendet, wenn Verbrauch und Neubildung des Empfangsstoffes in den bestrahlten Sehzellen gleich geworden sind. Die dazu erforderliche Zeit, d. i. die Anpassungszeit, ist um so länger, je größer der Unterschied zwischen der Stärke der anfänglichen Bestrahlung und der an ihre Stelle getretenen ist, nicht nur, wenn einer schwächeren Bestrahlung eine stärkere, sondern auch, wenn einer stärkeren eine schwächere gefolgt ist. Der stärkeren Bestrahlung entspricht ein größerer Empfangsstoffverbrauch und eine stärkere Reizung der mit den Sehzellen verbundenen nervösen Substanz, der schwächeren Bestrahlung ein kleinerer Verbrauch und eine schwächere Reizung. Denn nur der durch chemische Wirkung der Strahlung auf den Empfangsstoff bedingte Verbrauch desselben vermag einen Reiz auf die nervöse Substanz abzugeben, während seine Neubildung an sich keine Wirkung auf dieselbe hat. Insofern verhält sich der Empfangsstoff einer Netzhautstelle ähnlich wie ein Herd, dessen Heizkraft von der Menge der brennenden und nur mittelbar von der Menge der gleichzeitig zugeführten Kohle abhängt.

Anderes gilt von der nervösen Substanz. Der für sie beim Verbrauch des Empfangsstoffes erzeugte Reiz, d. h. der eigentliche Sehreiz, ist zwar für jedes einer bestrahlten Sehzelle funktionell zugehörige Element der Sehsubstanz ein Antrieb zur gesteigerten Dissimilierung, aber jede Steigerung der Dissimilierung eines Elementes mindert infolge der Induktion

die Dissimilierung der übrigen Elemente und vermehrt zugleich deren Assimilierung so lange, bis das Verhältnis zwischen Dissimilierung und Assimilierung $(D:A)$ überall dasselbe und damit auch die Helligkeit überall die gleiche geworden ist. Hiermit ist die Anpassung vollendet. Dieser vollständigen Anpassung an eine gegebene Bestrahlung entspricht also zwar im Empfänger eine Gleichheit zwischen Verbrauch und Ersatz des Empfangsstoffes, in der Sehsubstanz aber nur eine Gleichheit des Verhältnisses zwischen Dissimilierung und Assimilierung, wobei die Größe derselben und das Gewicht der Empfindung an verschiedenen Stellen verschieden sein kann, wie dies alles in früheren Paragraphen ausführlich dargelegt wurde.

Die Anpassung der Sehsubstanz folgt also der Anpassung des Empfängers und obwohl sie sozusagen viel labiler ist als der Empfänger und auf eine einmalige starke und plötzliche Sehreizbildung infolge plötzlicher Änderung der Lichtstärke des Netzhautbildes mit einer ganzen Reihe von gegensätzlichen Änderungen ihres Zustandes zu reagieren vermag, so verrät sich doch diese ihre Eigenschaft bei kleineren oder nicht zu schnell verlaufenden Änderungen der Lichtstärke eines Netzhautbildes wenig oder gar nicht.

Tritt eine Änderung der Bestrahlung nicht bloß für einen Teil der Netzhaut ein, sondern ändert sich die Gesamtbeleuchtung der eben sichtbaren Außenwelt, so würde, wie schon gesagt wurde, sich das ganze somatische Sehfeld bis zu völliger Gleichheit der Helligkeit aller seiner Teile an die neue Beleuchtung anpassen, wenn es uns möglich wäre, das Auge so lange in genau derselben Stellung festzuhalten, und zugleich jede Veränderung der Lichtstärke im Gesamtnetzhautbilde auszuschließen.

Von der sukzessiven Adaptation. Unter sukzessiver Adaptation (vgl. § 6) verstehe ich im allgemeinen die Anpassung des Sehorganes an die Gesamtbeleuchtung des Gesichtsfeldes, von welcher letzteren die Intensität und Qualität des von nicht selbstleuchtenden Dingen zurückgeworfenen und das Netzhautbild erzeugenden Lichtes abhängt. Während Aubert unter Adaptation nur die nach völliger Verfinsterung des Sehfeldes bei Dunkelaufenthalt in finsterem Raume und also bei ganz lichtfreier Netzhaut eintretende Zunahme der Lichtempfindlichkeit verstand, habe ich den Begriff der Adaptation erweitert und von der Aubertschen Dunkeladaptation die Helladaptation unterschieden. Dem Zustande, in dem sich nach Aubert das Sehorgan bei maximaler Dunkeladaptation befindet, entspricht der Nullpunkt der Helladaptation[1]), und man hat ebenso viele Stufen derselben zu unterscheiden, als es Intensitätsstufen der allgemeinen Beleuchtung des Gesichtsfeldes gibt, insoweit diese Intensität innerhalb der Grenzen bleibt, bis zu denen die Adaptation zu folgen vermag.

1) Über Ermüdung und Erholung des Sehorganes. Graefes Arch. Bd. XXXVII. 3. S. 32.

Beim gewöhnlichen Sehen ist, wie wir sahen, das Auge in fortwährender sprungweiser Bewegung. Wegen der damit verbundenen Verschiebungen des Gesamtnetzhautbildes empfängt eine und dieselbe Netzhautstelle in raschem Wechsel die Bilder sehr verschieden lichtstarker Außendinge. Doch wird, wenn die Gesamtbeleuchtung der Außendinge eines gegebenen Gesichtsfeldes längere Zeit hindurch sich nicht wesentlich ändert, auch die *durchschnittliche* Belichtungsstärke einer Netzhautstelle sich nicht erheblich ändern und um die Anpassung an den durchschnittlichen Wert der sukzessiv verschiedenen Belichtungen handelt es sich, wenn von einer Anpassung an eine bestimmte Gesamtbeleuchtung des Gesichtsfeldes beim gewöhnlichen Sehen die Rede ist.

Den verschiedenen funktionellen Eigentümlichkeiten der Einzelteile des somatischen Sehfeldes entsprechend befinden sich die letzteren bei derselben Gesamtbeleuchtung (nach vollendeter Adaptation) im allgemeinen auf verschiedenen Stufen der Adaptation. Deshalb handelt es sich eigentlich nie um eine überall gleiche Adaptation, sondern um eine Mannigfaltigkeit örtlicher Anpassung oder *lokaler Adaptation*, wie ich sie seinerzeit bezeichnet habe, und wenn man von einer erfolgten Adaptation an die allgemeine Beleuchtung des Gesichtsfeldes spricht, kann man nur die Gesamtheit der gleichzeitig in den verschiedenen Bezirken des Sehfeldes bestehende Adaptationsstufen meinen.

Wenn die Augen einmal ausnahmsweise genügend lange keinerlei aktive oder passive Bewegungen ausführen, und wenn gleichzeitig alle eben sichtbaren Außendinge festliegen und ihre Lichtstärken völlig unverändert bleiben, so wird sich jede somatische Sehfeldstelle ebenfalls an ihre jetzt wirklich konstant bleibende Beleuchtungsstärke adaptieren. Dabei wird, weil das Gesamtnetzhautbild gewöhnlich in seinen einzelnen Teilen von verschiedener Lichtstärke ist, auch die Anpassung der einzelnen Sehfeldbezirke eine verschiedene sein können. Diese Adaptation bei feststehendem Auge eignet sich begreiflicherweise zur genaueren Untersuchung viel besser als die Adaptation an die durchschnittliche Beleuchtungsstärke bei bewegtem Auge. Doch ist das längere Fixieren eines Außenpunktes ein unnatürlicher, den Augen aufgezwungener Zustand, der immer wieder durch kleine unwillkürliche Augenbewegungen unterbrochen wird. Im übrigen, abgesehen von diesem absichtlich herbeigeführten langen Stillstand der Augen, kommt ein solcher gesunderweise nur vor, wenn wir »gedankenlos« oder »in Gedanken versunken« vor uns hinstarren und gar nicht auf das eben Sichtbare achten.

Die Beziehungen zwischen der bunten Qualität der Farben und der Schwingungszahl der optischen Strahlen.

§ 60. Die Verteilung der Farben im Spektrum. Wie schon in § 12 erörtert wurde, läßt sich die Gesamtheit aller möglichen Farbentöne auf einer in sich zurücklaufenden Linie derart angeordnet denken, daß die Verschiedenheit des Tones je zweier unmittelbar benachbarter Farben minimal, die Ähnlichkeit aber maximal ist, und also die Farbentöne überall stetig ineinander übergehen. Zweckmäßig wählt man als geschlossene Linie einen Kreis. Dieselbe Reihenfolge der Farbentöne, wie sie ein solcher sogenannter Farbenzirkel zeigt, finden wir im Spektrum wieder, doch fehlt letzterem stets ein Teil der Töne des Farbenzirkels, denn es endet für das normale und chromatisch neutral gestimmte Auge einerseits mit einem ins Gelbe spielenden Rot, anderseits mit einem Violett.

Man denke sich einen in genügender Größe ausgeführten und aus möglichst freien Farben bestehenden Farbenzirkel in 100 oder mehr Sektoren zerschnitten, so würde man ebensoviele kleine Täfelchen erhalten, deren jedes einen anderen Ton hätte. Diese Täfelchen könnte man regellos durcheinandergeworfen einem Laien vorlegen, der nie einen Farbenzirkel oder ein Spektrum gesehen, aber einen guten Farbensinn hätte, und ihm die Aufgabe stellen, die Täfelchen nach den Ähnlichkeiten ihrer Farben aneinanderzureihen: er würde die Farben ebenso anordnen, wie sie im Spektrum aufeinanderfolgen. Je nachdem einer diese Übereinstimmung zwischen der lediglich durch schlichte Farbenvergleichung gefundenen mit der durch das physikalische Experiment erzeugten Farbenfolge selbstverständlich oder höchst wunderbar findet, wird man an seine Äußerungen über Licht- und Farbensinn einen sehr verschiedenen Maßstab anzulegen haben. —

Mit der Reihenfolge der Farben ist noch nicht deren räumliche Verteilung im Spektrum bestimmt. In einem richtig entworfenen Farbenkreise hat jeder bestimmte Farbenton auch einen ganz bestimmten Ort, weil der Kreis durch die vier Urfarben in vier gleich große Abschnitte (Quadranten) geteilt ist, und jeder Punkt eines solchen Abschnittes einem bestimmten

Verhältnis der beiden Ähnlichkeitsgrade entspricht, welche der hier liegende Farbenton mit den beiden, den Quadranten begrenzenden Urfarben hat. Im Spektrum ist die räumliche Verteilung stets eine ganz andere und überdies je nach der Art seiner Entstehung verschiedene. Während z. B. der Ort des Urgrün in einem prismatischen Spektrum für ein chromatisch neutral gestimmtes Auge beiläufig der Mitte des ganzen Spektrums enspricht, liegt das Urgrün im Interferenzspektrum dem violetten Ende viel näher als dem roten.

Von den vier bunten Urfarben des Farbenzirkels finden wir unter gewöhnlichen Umständen nur drei im Spektrum wieder, nämlich Urgelb, Urgrün und Urblau, nicht aber das Urrot. Das am einen Ende des Spektrums erscheinende Rot spielt deutlich ins Gelbe, es sei denn, daß die Netzhautstelle, mit der man es sieht, zuvor mit gelbwirkendem Lichte bestrahlt worden war. Solchenfalls kann es allerdings in einem Rot erscheinen, welches weder gelblich noch bläulich ist. Für ein überall chromatisch neutral gestimmtes Auge aber gibt es im Spektrum nur die zuerst genannten drei Urfarben, deren Orte im Spektrum ich als die drei Kardinalpunkte desselben bezeichnet habe.

Während im allgemeinen der an einer Stelle des Spektrums erscheinende Farbenton sich mit der Intensität des spektral zerlegten Lichtes ändert, gilt dies, wie sich im Folgenden zeigen wird, nicht für die Kardinalpunkte, deren Farbenton von den Änderungen der Lichtstärke unabhängig zu sein scheint, solange die chromatisch neutrale Stimmung der betroffenen Sehstelle besteht.

Durch die drei Kardinalpunkte wird das Spektrum in vier Abschnitte geteilt, einen vom Urgelb bis an das rote Ende reichenden rot-gelben und einen vom Urblau bis an das violette Ende reichenden rot-blauen Abschnitt, während die zwischen dem Urgelb und Urblau liegende Strecke durch das Urgrün in einen grün-gelben und einen grün-blauen Abschnitt geteilt wird. Es enthält also der vom Endrot bis zum Urgrün sich erstreckende Teil des Spektrums durchgängig Farben von mehr oder minder deutlicher Gilbe, während vom Urgrün bis zum Endviolett alle Farben eine mehr oder minder deutliche Bläue haben. Die zwischen Urgelb und Urblau liegende Strecke umfaßt alle grünhaltigen Farbentöne; die rothaltigen Töne aber, insoweit sie für das chromatisch neutral gestimmte Auge im Spektrum enthalten sind, liegen in den beiden Endabschnitten.

Die schematische Figur möge diese Verteilung der Farbentöne im Interferenzspektrum veranschaulichen[1]). Da man gewöhnt ist, sich im Spektrum des Tageslichtes mit Hilfe der besonders deutlichen Fraunhoferschen Linien

[1]) Die hier erwähnte Abbildung hat sich im Nachlasse nicht vorgefunden. Offenbar bestand die Absicht, die Abbildung auf Tafel I mit entsprechenden Änderungen wiederzugeben. Hess.

zu orientieren und nicht die Schwingungszahl, sondern die Wellenlänge einer einfachen Strahlung zur Bezeichnung derselben zu benutzen, so ist die Lage jener Linien mit ihren Wellenlängen in das Schema eingetragen. Die rote Kaliumlinie 769,9 $\mu\mu$ einerseits und die Linie H_2 393 $\mu\mu$ andererseits begrenzen unser Schema, obwohl das sichtbar Spektrum unter günstigen Bedingungen beiderseits noch etwas weiter reichen kann.

Newton unterschied 7 Farben (rubens, aureus, flavus, viridis, caeruleus, indicus, violaceus) und teilte dementsprechend den Kreis in 7 übrigens ungleich lange Teile, die er mit den 7 Intervallen zwischen den 8 Tönen einer Oktave in einen eigenartigen Vergleich brachte. In der Mitte jedes Bezirkes oder Bogens sollte die entsprechende Farbe am reinsten sein, an jeder anderen Stelle des Bogens aber um so mehr nach der einen oder anderen von den benachbarten Hauptfarben neigen, je größer der Abstand der Stelle von der Mitte ihres Bezirkes war. Dieser Anordnung der Farbentöne liegt das prismatische Spektrum zugrunde, sie paßt schon nicht mehr auf das Diffraktionsspektrum; ich habe sie nur deshalb hier angeführt, um zu zeigen, daß die räumliche Verteilung der Farbentöne im Spektrum überhaupt nicht maßgebend sein kann, wenn es sich darum handelt, die Farbentöne rationell auf einer geschlossenen Linie anzuordnen, was meiner Ansicht nach nur auf dem von mir betretenen Wege erreichbar ist. Jetzt handelt es sich nur darum, die, wie wir annehmen müssen, gesetzmäßigen Beziehungen festzustellen, welche zwischen jeder einzelnen der einfachen Strahlungen in der spektral geordneten Reihe einerseits und der im rationellen Farbenkreise geordneten Reihe der Farbentöne anderseits bestehen.

Für den physikalisch Unterrichteten verbindet sich leicht mit verschiedenen Farbentönen des Spektrums der Gedanke an bestimmte Wellenlängen so fest, daß er schließlich jeder einzelnen optischen Strahlenart einen bestimmten Farbenton zuschreibt und die Strahlung nach letzterem benennt statt nach ihrer Schwingungszahl oder Wellenlänge. Doch der Farbton, mit welchem unser Sehorgan auf eine Strahlung bestimmter Wellenlänge reagiert, hängt so sehr von der jeweiligen Beschaffenheit des Organs und der Energie der Strahlung ab, daß die Bezeichnung der verschiedenen einfachen Strahlen mit bestimmten Namen überhaupt nur unter Voraussetzung ganz bestimmter Bedingungen einen Sinn hat. Denn eine und dieselbe Strahlung kann je nach den Umständen in allen überhaupt möglichen Farbentönen gesehen werden.

§ 61. Das Interferenzspektrum des Himmelslichtes. Da im Interferenzspektrum gleichen Unterschieden der Schwingungszahlen oder der Wellenlängen gleichgroße Strecken des Spektrums entsprechen, so macht dasselbe die Art der Abhängigkeit des Farbentones von der Wellenlänge viel anschaulicher als das prismatische Spektrum. Es ist schon des-

halb zweckmäßig, sich zuerst eine Anschauung des Interferenzspektrums zu verschaffen, und zwar mit Benutzung des Himmelslichtes. Denn da das Sehorgan des Menschen sich, stammesgeschichtlich betrachtet, unter der Wirkung dieses Lichtes entwickelt hat, und noch heute alle nicht von der Sonne stammenden Belichtungen unserer Netzhaut nur als Ausnahmen zu gelten haben, so ist auch für die physiologische Optik die Beschaffenheit des Sonnen- und Himmelslichtes von höherer Bedeutung, als die der künstlichen Lichtquellen.

Ein 1—2 cm hoher Spalt im Fensterladen eines Dunkelzimmers, durch welchen das Himmelslicht zum 30 cm vom Spalte entfernten Auge des Beobachters gelangen kann, und ein vor das Auge gehaltenes Glasgitter genügen, um ein Spektrum erster Ordnung von zweckmäßiger Länge zu erhalten. Durch Änderung der Breite des Spaltes läßt sich die Lichtstärke des Spektrums verkleinern oder vergrößern. Nähert man das Auge dem Spalt, so verkürzt sich das Spektrum, seine Farben schieben sich mehr zusammen und seine Helligkeit wächst; entfernt man das Auge, so verlängert sich das Spektrum, seine Farben breiten sich aus und seine Helligkeit nimmt ab. Bei passender Lichtstärke und Enge des Spaltes unterscheidet man leicht die Linien *C*, *D*, *E*, *b*, *F* und *G*. Die Wellenlänge, welche einer zwischen zwei dieser Linien gelegenen Stelle entspricht, läßt sich üblicherweise angenähert bestimmen, wenn man das Verhältnis abschätzt, in welchem der gegenseitige Abstand der beiden Linien durch die fragliche Stelle geteilt wird.

Da das Pigment der Macula lutea insbesondere die blaugrün-, blau- und violettwirkenden Strahlen erheblich absorbiert, bevor sie zum Sehepithel der Netzhaut gelangen, so sieht man bei Betrachtung des entsprechenden Spektralbezirkes einen dunklen verwaschenen Fleck an der Stelle, welche man eben anblickt. Im verhältnismäßig hellen Blaugrün eines Spektrums von mittlerer Helligkeit ist dieser dunkle Fleck sehr auffällig, im schon an und für sich dunklen Violett aber zuweilen kaum noch kenntlich. Auch verschwindet er infolge örtlicher Adaptation des Auges (vgl. § 59) sehr bald, wenn der Blick sich länger im blauwertigen Abschnitte des Spektrums aufhält, wird aber sogleich wieder sehr deutlich, wenn man zwischendurch den gelbwertigen Abschnitt betrachtet hat. Für die richtige Beurteilung des Farbentones und der relativen Helligkeit der bezüglichen Stelle des Spektrums ist diese makulare Absorption sehr störend. Will man also eine Farbe des blauwertigen Abschnittes vom Grün bis zum Endviolett deutlich sehen, so muß man bei 30 cm Abstand des Auges vom Spalte den Blickpunkt 2—3 cm über oder unter die Stelle des Spektrums verlegen.

Sehr zweckmäßig ist es, zwei in einer Flucht liegende, z. B. bei horizontaler Lage des Spektrums senkrecht übereinanderliegende Lichtspalte

im Fensterladen anzubringen, und zwar so, daß ihr gegenseitiger Abstand, 30 cm Augenabstand vorausgesetzt, beiläufig 2 cm beträgt. Wenn man beiden Spalten eine verschiedene Breite gibt, so erhält man zwei übereinanderliegende Spektren von entsprechend verschiedener Intensität und kann je zwei Stellen gleicher Wellenlänge in betreff der Verschiedenheit ihres Aussehens miteinander vergleichen. Dabei kann man entweder eine Stelle des einen Spektrums fixieren und mit der indirekt darüber oder darunter gesehenen Stelle des anderen vergleichen oder noch besser den Blickpunkt auf die Mittellinie des finsteren Zwischenraums zwischen den beiden Spektren verlegen und die Farben der beiden indirekt gesehenen Stellen gleicher Wellenlänge miteinander vergleichen. Auch wenn beide Stellen noch in das Bereich der Makularabsorption fallen, kann es sich wegen der vom Zentrum nach der Peripherie rasch abnehmenden Pigmentierung der Makula nur noch um die schwache Absorption von zwei beiläufig gleich schwach pigmentierten Stellen handeln, wodurch das wahre Verhältnis zwischen den Lichtstärken der beiden miteinander verglichenen Stellen gleicher Wellenlänge praktisch genommen nicht verändert wird.

Das lichtstärkere Spektrum unterscheidet sich vom lichtschwächeren in besonders auffallender Weise dadurch, daß es gelber und blauer erscheint als das lichtschwache. Wo im lichtschwachen Spektrum die Farbe eine nur undeutliche Gilbe oder Bläue zeigt, treten beide im lichtstarken deutlich hervor und machen sich um so mehr auf Kosten der Röte bzw. Grüne geltend, je größer die Lichtstärke ist. Im Spektrum von mittler Lichtstärke sieht man das reine Gelb ein wenig grünwärts von der Linie *D*, und das reine Blau etwas violettwärts von der Linie *F*. Im lichtschwachen Spektrum aber ist an den ebengenannten Stellen das Urgelb und Urblau kaum erkennbar: vielmehr geht an der einen Stelle ein Rötlichgelb ohne deutliche Einschaltung von Urgelb in ein Grünlichgelb über, an der anderen Stelle ein Grünlichblau ebenfalls scheinbar unmittelbar in ein Rötlichblau. So kommt es, daß das lichtschwache Spektrum in drei beiläufig gleichlange Strecken zerfällt, nämlich in eine vorwiegend grünliche Mittelstrecke, eine violette und eine vorwiegend rötliche Strecke. Das lichtschwache prismatische Spektrum verhält sich ganz ähnlich, nur daß hier wegen der mit abnehmender Wellenlänge wachsenden Dispersion die vorwiegend rötliche Strecke nur etwa halb so lang, die violette Strecke aber etwa doppelt so lang ist als die grünliche Mittelstrecke.

Das mit der Lichtstärke des Spektrums wachsende Hervortreten der Gilbe oder Bläue aller Zwischenfarben hat zur Folge, daß dabei ein immer größerer Teil der violetten Strecke sich auffallend bläut, daß ferner die grünhaltigen Farben der Mittelstrecke und die rothaltigen Farben der langwelligen Endstrecke immer gelblicher werden, um so mehr, je näher sie

der urgelben Stelle sind. So wird auf der einen Seite das eigentliche Violett immer mehr an das eine, das eigentliche spektrale Rot an das andere Ende des Spektrums gedrängt. Zugleich verlängert sich mit wachsender, ein gewisses Mittelmaß nicht überschreitender Lichtstärke das Spektrum beiderseits, und zwar zunächst nur wenig an seinem kurzwelligen, viel bedeutender an seinem langwelligen Ende. Hier verwandelt sich der vorher stark mit Schwarz verhüllt gewesene Endteil in Orangerot, und neues Spektralrot taucht aus dem früheren Dunkel auf, während sich am anderen Ende eine geringe Verlängerung des Violettes zeigt.

Fast gar keinen Aufschluß erhält man bei den eben beschriebenen Beobachtungen am Gitterspektrum über die von der Lichtstärke abhängigen Farbenänderungen der kleinen Strecke, welche zwischen der urblau und urgrün erscheinenden Stelle liegt. Während die von der urblauen Stelle ausgehende Bläue sich mit wachsender Lichtstärke immer deutlicher nach dem kurzwelligen Ende hin ausbreitet, läßt sich ihre Ausbreitung in der anderen Richtung auch bei indirekter Betrachtung des Spektrums nicht genauer verfolgen. Dies hat seinen Grund darin, daß der Wellenlängeunterschied zwischen der deutlich urblau und der bereits deutlich grün erscheinenden Stelle ein verhältnismäßig sehr kleiner ist. Die innerhalb dieser Strecke zu erwartenden ganz dicht zusammengedrängten blau-grünen Zwischenfarben entziehen sich der Beobachtung um so mehr, als die durch absichtliche und unabsichtliche Verlagerung des Blickpunktes bedingten Wirkungen des chromatischen Kontrastes schon an sich fortwährende Änderungen der Farbe einer beobachteten Stelle des Spektrums mit sich bringen. Nicht ganz so ungünstig ist die Sachlage in einem prismatischen Spektrum von gleicher scheinbarer Länge, weil hier die fragliche Strecke im Verhältnis zur Länge des Spektrums größer, jedoch immer noch zu klein ist, um eine genaue Unterscheidung der fraglichen Farbentöne zu gestatten.

Steigert man die Lichtstärke über das gewöhnliche Mittelmaß hinaus, so nimmt die Vergilbung des langwelligen Teiles bis in die Nähe des dem Urgrün entsprechenden Kardinalpunktes noch zu, und bei einer gewissen, fast schon blendend wirkenden Lichtstärke scheint das Spektrum wieder aus drei ungefähr gleichlangen Abschnitten zu bestehen, einem orangefarbenen, einem schwach grünlich-gelben und einem weiß-blauen, und nur an den Enden des Spektrums sieht man einerseits noch etwas spektrales Rot, anderseits etwas Violett. Noch größere Lichtstärken wirken blendend und gestatten keine sichere Beobachtung.

Selbstverständlich läßt sich sowohl das prismatische als auch das Gitterspektrum durch physikalische Hilfsmittel beliebig vergrößern, doch galt es zunächst, auf die Besonderheiten relativ kurzer und überdies mit einfachen Mitteln herzustellender Spektren hinzuweisen, welche in mancher

Beziehung bessere Aufschlüsse geben, als die in großen Spektroskopen erzeugten[1]).

§ 62. **Herstellung und Beobachtung monochromatisch beleuchteter Felder.** Der Farbenton der eben betrachteten Stelle des Spektrums wird durch die gleichzeitig daneben erscheinenden Farben und auch dadurch beeinflußt, daß unmittelbar vorher eine andere Stelle des Spektrums betrachtet wurde. Diese Wirkungen des später ausführlich zu besprechenden simultanen und sukzessiven Buntfarbenkontrastes sind ausgeschlossen, wenn man sich die einzelnen Teile des Spektrums gesondert zur Anschauung bringt.

Im Okularrohr der zur Erzeugung eines prismatischen Spektrums dienenden Spektralapparate lassen sich an der Stelle, wo das Luftbild des Spektrums liegt, zwei von außen verschiebbare Blenden anbringen, mit denen man von beiden Seiten her das Spektrum so verdecken kann, daß nur ein nicht allzu schmaler, durch die Okularlinse vergrößerter Streifen sichtbar bleibt. Viel zweckmäßiger ist es nach dem Vorgange Maxwells das Okularrohr des Fernrohrs mit einem kurzen verschiebbaren Rohre ohne Linse zu vertauschen, das an seinem äußeren Ende durch einen Spaltapparat verschlossen und so eingestellt ist, daß der schmale Spalt in die Ebene des spektralen Luftbildes zu liegen kommt. Durch Drehung des Kollimators kann man jeden beliebigen Teil des Spektrums in den Spalt treten lassen. Bringt man das Auge dicht an den Spalt, so sieht man einen Teil der dem Auge zugewendeten Prismenfläche gleichmäßig in der

---

1) Für den Physiker sind manche an kurzen Spektren anzustellende und für den Physiologen oder Arzt wichtige Beobachtungen meist bedeutungslos und begegnen deshalb leicht einer gewissen Geringschätzung. So erwähnt H. Kayser in seinem Handbuch der Spektroskopie I. Bd. S. 491, 1900, eine von mir zum Nachweis der Blutfarbstoffe empfohlene einfache spektroskopische Vorrichtung in einer Weise, die sofort erkennen läßt, daß ihm als reinem Physiker der eigentliche Sinn dieser Vorrichtung ganz entgangen ist. Dieselbe besteht lediglich aus einer innen geschwärzten Röhre, an deren einem Ende sich ein Spalt, am anderen Ende ein kleines, passend gestelltes gleichseitiges Prisma befindet, durch welches das ihm ganz nahe gebrachte Auge in passender Richtung zu blicken hat, um das äußerst kurze, dafür aber sehr lichtstarke Spektrum zu sehen. Ist das Licht durch eine vor dem Spalte befindliche schwache Lösung eines Blutfarbstoffes gegangen, so erscheinen die charakteristischen Absorptionsbänder desselben im Spektrum als feine schwarze oder graue Striche. Man kann auf diese Weise viel geringere Spuren des gelösten Farbstoffes erkennen, als mit Hilfe der gewöhnlichen Spektralapparate. Die Empfindlichkeit des Apparates übertrifft auch noch die kleinen seitdem in den Handel gebrachten Spektroskope mit gerader Durchsicht und kurzem Spektrum. Schon die den Ärzten geläufige Tatsache, daß das Maximum der Sehschärfe an zweckmäßige Beleuchtung der Sehprobe gebunden ist, würde auch ohne Kenntnis der hier maßgebenden Gesetze des Helligkeitskontrastes verständlich machen, warum für den besonderen Zweck der kleine Apparat dem größeren Spektralapparat bedeutend überlegen ist.

eben eingestellten Farbe leuchten und hat den Vorteil, letztere auf einer größeren Fläche zu sehen.

Befindet sich dicht vor dem vertikalen Spalt ein horizontaler, dessen beide Schneiden symmetrisch zum Mittelpunkte des vertikalen ausgiebig verschiebbar sind, so kann man bald die ganze, bald nur einen beliebigen Teil der durch den Vertikalspalt kommenden Lichtmenge ins Auge gelangen lassen und auf diese Weise innerhalb gewisser Grenzen die Abhängigkeit des Farbentones von der Intensität der Strahlung beobachten.

Immerhin läßt sich auf diese Weise nur ein kleines, von den Dimensionen des Prismas abhängiges Farbenfeld erzielen; doch kann man letzteres bedeutend vergrößern, wenn man zwischen Spalt und Auge ein kurzes, für kleine Entfernungen berechnetes bildumkehrendes Fernrohr anbringt, dessen Objektivlinse dicht am Spalte liegt. Man sieht dann durch die Okularlinse die Öffnung einer in der Brennweite der Linse befindlichen Irisblende im jeweils eingestellten Farbentone leuchten und kann mit Hilfe dieser Blende den sichtbar bleibenden Teil des Feldes beliebig einengen.

Leider sind alle derartigen Vergrößerungen des monochromatischen Feldes, so zweckmäßig sie in vielen Beziehungen sind, nur für die langwelligen Strahlungen verwendbar; denn die über die Strahlen mittlerer Brechbarkeit hinausliegenden kurzwelligen Strahlungen erfordern, besonders bei künstlicher Lichtquelle, viel zu große Breiten des Kollimatorspaltes, wenn das Farbenfeld die für das Auge nötige Helligkeit haben soll. Je breiter aber der Spalt, desto weniger kann von eigentlich monochromatischer Beleuchtung des Farbenfeldes die Rede sein.

Denn was wir in der physiologischen Optik eine einfache Strahlung zu nennen pflegen, ist keineswegs eine Strahlung von nur einer Schwingungsfrequenz, vielmehr ein Gemisch von Strahlungen verschiedener Schwingungszahl, um so mehr, je breiter der Kollimatorspalt des Spektroskopes ist. Die unzureichende Intensität der zur Verfügung stehenden Lichtquellen zwingt uns bei Benutzung kurzwelliger Strahlungen dem Spalte eine verhältnismäßig große Breite zu geben.

Da der Farbenton sich mit der Schwingungsfrequenz nicht sprungweise, sondern stetig, wenn auch in verschiedenen Spektralbezirken mit verschiedener Geschwindigkeit ändert, so läßt sich wenigstens für langwellige Strahlungen innerhalb gewisser enger Grenzen der Spaltbreite der von dem durchgelassenen Strahlgemisch erzeugte Farbenton demjenigen Tone gleichsetzen, welchen eine durch die Mittellinie des Spaltes eintretende homogene Strahlung erzeugen würde, falls ihre Energie der Gesamtenergie des Strahlgemisches gleich wäre. Da nur Spalte benutzt werden dürfen, deren Breite durch symmetrische Verschiebung ihrer beiden Schneiden geändert wird, so ist diese sogenannte mittle Wellenlänge leicht bestimmbar.

Das in unseren Gegenden selten zur Verfügung stehende direkte Sonnenlicht ist nur zur Herstellung eines sogenannten objektiven Spektrums verwendbar. Die Erzeugung eines solchen mittels künstlicher Lichtquellen ist umständlich und zu physiologisch-optischen Zwecken nur ausnahmsweise erforderlich.

§ 63. Von den optischen Valenzen der spektralen Strahlungen. Das Vermögen einer Strahlung, im somatischen Sehfelde bestimmte Veränderungen zu bewirken, mit denen bestimmte Änderungen im psychischen Sehfelde gesetzmäßig verbunden sind, nenne ich das Reizvermögen oder die optische Valenz der Strahlung. Art und Größe solcher Wirkung hängt einerseits von der Art und Stärke der Strahlung, andererseits von der Art und dem jeweiligen Zustande des bestrahlten Sehfeldbezirkes ab. Die einzelnen Flächenelemente, in die man sich das ganze somatische Sehfeld zerlegt denken kann, sind nicht sämtlich gleicher Art, und der Zustand oder, wie ich es nannte, die Stimmung eines und desselben Elementes ist keine stetig beharrende, sondern von mehrfachen, ebenfalls veränderlichen Bedingungen abhängig. Eine bestimmte optische Valenz läßt sich also einer Strahlung nur in bezug auf ein Sehfeldelement von bestimmter Art und unter Voraussetzung eines bestimmten Zustandes des Elementes zuschreiben. Als solchen Zustand wählen wir für die Untersuchung der bunten Lichtwirkungen wenigstens zunächst den chromatisch-neutralen[1]), in welchem alle Teile des somatischen Sehfeldes sich befinden, wenn das Auge so lange vor jeder buntwirkenden Bestrahlung geschützt worden ist, bis die Nachwirkungen vorhergegangener buntwirkender Strahlungen verschwunden sind.

Die Bezeichnung für die Art einer buntwirkenden Valenz oder, kurz gesagt, der Buntvalenz einer Strahlung, erfolgt auf Grund der Eigenschaften der Farbe, welche unter dem Einflusse der Strahlung an der betroffenen Sehfeldstelle entsteht. Wenn z. B. an die Stelle des nach Herstellung des chromatisch-neutralen Zustandes sichtbar gewesenen tonfreien Eigengrau unter dem Einfluß der Strahlung eine rote Farbe tritt, so schreiben wir der Strahlung eine Rotvalenz zu, bläut sich die Stelle, so hat die Strahlung eine Blauvalenz, zeigt sich gleichzeitig Röte und Bläue, so hat die Strahlung sowohl eine Blau- als eine Rotvalenz. Wir benutzen also die Art des bunten Bestandteiles — vgl. § 14 — der erscheinenden Farbe als des bewirkten psychischen Phänomenes zur Benennung der buntwirkenden Valenz der Strahlung. Wie wir von einem roten, gelben, grünen, grauen Bestandteil einer bunten Farbe sprechen, so auch von

1) Der chromatisch-neutrale Zustand der Sehsubstanz darf nicht mit dem Zustande ihrer Mittelwertigkeit verwechselt werden. Die Sehsubstanz kann auf jeder Stufe der Wertigkeit chromatisch-neutral gestimmt sein.

ebensolchen Bestandteilen einer buntwirkenden Strahlungsvalenz. Und wie der bunte Bestandteil einer Farbe sich im allgemeinen wieder als aus zwei urfarbigen Teilen bestehend auffassen läßt, so läßt sich auch eine buntwirkende Valenz im allgemeinen in zwei urfarbig wirkende Bestandteile oder Urvalenzen zerlegt denken.

Außer der buntwirkenden müssen wir jeder einfachen Strahlung auch eine weißwirkende, kurz Weißvalenz, zuschreiben, weil die zunächst eigengraue Sehfeldstelle infolge monochromatischer Bestrahlung nicht nur bunt, sondern zugleich auch weißlicher werden kann. Solange es sich nur um die für das chromatisch-neutral gestimmte Auge geltenden Beziehungen handelt, können wir von den weißwirkenden Teilvalenzen der einfachen Strahlungen vorerst absehen.

Es liegt im Begriffe der optischen Valenz, daß dieselbe der Intensität der Strahlung proportional ist; denn unter optischer Valenz einer Strahlung ist nicht die Art und Größe ihrer Wirkung zu verstehen, welche, wie gesagt, je nach dem Zustande des Sehorganes verschieden sein kann, sondern nur die Art und Größe des Wirkungsvermögens, welches der Strahlung bei einem ganz bestimmten Zustande des Sehorgans eigen ist. Die Lichtempfindung, d. h. die als eine Änderung des psychischen Sehfeldes in unser Bewußtsein tretende Wirkung der Strahlung ist nicht schon in demselben Augenblick da, in welchem die letztere auf die Netzhaut wirkt, sondern hat eine sog. Entstehungszeit. Der infolge einer Änderung der Netzhautbestrahlung unter Mitwirkung der Induktion eintretende neue Zustand der Sehsubstanz bedarf, wie ich schon S. 167 bemerkte, einer gewissen, wenn auch kurzen Zeit zu seiner Herstellung. Während dieser Zeit erfährt der höchst labile Zustand der lebendigen Substanz eine rasch fortschreitende Änderung und wird trotz gleichbleibender Bestrahlung von Moment zu Moment ein anderer. Erst des psychischen Endergebnisses dieser Vorgänge werden wir uns gewöhnlich bewußt. Nur unter besonderen Umständen und bei gespannter Aufmerksamkeit vermögen wir einzelne Phasen dieses Geschehens gleichsam in ihrem Fluge zu erhaschen, wie später zu erörtern sein wird.

So wenig mit der Richtung und Größe einer Kraft, welche auf ein Bewegliches wirkt, ohne weiteres auch die Bahn und Geschwindigkeit der unter der fortwährenden Wirkung der Kraft erfolgenden Bewegung gegeben ist, weil für letztere mancherlei andere Bedingungen mit maßgebend sind, so wenig ist mit dem Verhältnis zwischen den beiden bunten Urvalenzen einer Strahlung ohne weiteres auch das Verhältnis gegeben, welches zwischen den beiden urfarbigen Komponenten der von der Strahlung erzeugten Empfindung besteht.

Wenn sich gezeigt hätte, daß jede einfache Strahlung bei chromatisch-neutral gestimmtem Auge nur eine und also ganz bestimmte bunte Farbe

zu erzeugen vermag, so hätte dies bewiesen, daß die beiden urfarbigen Komponenten der Farbe zu den gleichnamigen urfarbig wirkenden Valenzen der Strahlung und folglich auch zur Intensität der letzeren proportional sind. Wäre dies wirklich der Fall, so könnten wir jeder einfachen Strahlung ohne weiteres dasjenige Größenverhältnis ihrer beiden (physischen) urfarbig wirkenden Valenzen zuschreiben, welches zwischen den beiden (psychischen) urfarbigen Bestandteilen der von der Strahlung bewirkten Farbe besteht. Das auf der oberen Hälfte der Tafel I, S. 42 gegebene Schema eines Farbenzirkels wäre dann zugleich eine übersichtliche Darstellung aller Verhältnisse gewesen, welche zwischen den beiden bunten Urvalenzen der einfachen Strahlung bestehen. Wir brauchten nur zu jedem Farbentone des Farbenzirkels die Schwingungszahl bzw. Wellenlänge der einfachen Strahlung hinzuzudenken, welche diesen Farbenton erzeugen würde. Dächten wir uns ferner diesen Farbenzirkel unter Weglassung der im Spektrum fehlenden Farbentöne geradlinig gestreckt, so wäre auch für jede einfache Strahlung das Verhältnis zwischen ihren beiden urfarbig wirkenden Valenzen anschaulich gemacht.

So würde es sich, wie gesagt, verhalten haben, wenn für das neutral gestimmte Auge nur die Wellenlänge jeder einfachen Strahlung das Bestimmende für den von ihr erzeugten Farbenton wäre. Doch schon bei Betrachtung des Gesamtspektrums bemerkten wir, daß die außerhalb der drei Kardinalpunkte liegenden, zwischenfarbigen Stellen des Spektrums bei größeren Intensitätsänderungen ihren Ton sehr merklich änderten, während dies in der Gegend eines Kardinalpunktes nicht der Fall zu sein schien. Wenn wir, wie im vorigen Paragraphen beschrieben wurde, unter Ausschluß simultaner und sukzessiver Kontrastwirkungen die Spektralfarben einzeln auf größeren Feldern erscheinen lassen, so zeigt sich ebenfalls, daß trotz chromatisch-neutraler Stimmung des Auges rot-gelbe und gelbgrüne Farben bei größerer Lichtstärke gelber, blau-rote blauer erscheinen als bei kleinerer Lichtstärke, während eine größere Bläulichkeit der grünblauen Farben bei größerer Lichtstärke zwar bemerkbar, aber viel weniger auffallend ist. Das von der Strahlung eines Kardinalpunktes erzeugte Gelb, Grün oder Blau aber scheint bei größeren Intensitätsänderungen zwar seine Freiheit, nicht aber seinen Ton zu ändern.

Hiernach gäbe es drei einfache Strahlungen, welche unabhängig von ihrer Intensität den bestimmten Farbton einer Urfarbe hervorrufen, wenn sie auf das chromatisch-neutral gestimmte Augen wirken. Die Art der bunten Wirkung dieser Strahlungen wäre also nur an ihre Schwingungszahl oder Wellenlänge gebunden, und letztere wäre in strengerem Sinne zugleich ein Ausdruck für die Art der bunten Valenz der Strahlung.

Anderes gilt von den Strahlungen, durch welche eine Zwischenfarbe, d. h. eine Farbe erzeugt wird, in der sich zwei urfarbige Komponenten

unterscheiden lassen; denn das Deutlichkeitsverhältnis dieser beiden Bestandteile ändert sich mit der Intensität der Strahlung. So kann z. B., wie wir sahen, an derselben Stelle des rot-gelben Spektralabschnittes bei kleinen Intensitäten der rote Bestandteil der Farbe größer, d. h. deutlicher sein als der gelbe, während bei größeren Intensitäten der gelbe Bestandteil überwiegt.

Enthält also die von einer einfachen Strahlung erzeugte Farbe zwei urfarbige Bestandteile, so ergibt sich aus der Art der Farbe zwar die Art der beiden entsprechenden Teilvalenzen der Strahlung, aber über das Größenverhältnis zwischen diesen Teilvalenzen erhalten wir keinen Aufschluß. Denn der vom Deutlichkeitsverhältnis ihrer beiden urfarbigen Komponenten bestimmten Qualität der bunten Farbe entspricht nicht notwendig dasselbe Größenverhältnis zwischen den beiden urfarbig wirkenden Teilvalenzen der Strahlung.

Als den Sehfeldbezirk, in welchem wir die einfachen Strahlungen auf ihre Buntvalenzen untersuchen wollen, wählen wir im allgemeinen den fovealen und seine nächste Umgebung, kurz, den makularen Bezirk, weil hier der Farbensinn am vollkommensten entwickelt ist. Die morphologischen Verschiedenheiten des Sehepithels innerhalb dieses Bezirkes lassen von vornherein auch funktionelle Verschiedenheiten innerhalb desselben erwarten, denn die Verschiedenheiten der Sehfeldelemente[1]) können eine Ungleichartigkeit derselben bedeuten. Von einer bestimmten Valenz einer Strahlung läßt sich aber, wie oben erörtert wurde, nur in bezug auf eine bestimmte Art der Sehfeldelemente sprechen. In der Tat besteht eine Ungleichartigkeit derselben, wie wir später sehen werden, auch innerhalb des makularen Bezirkes, jedoch im wesentlichen nur in bezug auf die Weißvalenz der Strahlungen. Betreffs der chromatischen Funktion aber läßt sich der gesamte Bezirk als gleichartig nehmen, weil in allen Teilen desselben bei überall gleicher monochromatischer Bestrahlung auch ein und derselbe Farbenton erscheint, und etwaige Verschiedenheiten desselben fast immer unter der Schwelle der Wahrnehmung bleiben. Wir dürfen also den einzelnen einfachen Strahlungen in bezug auf den ganzen Bezirk, wenigstens sehr angenähert, dieselbe Buntvalenz zuschreiben.

§ 64. Über binäre Strahlgemische. Zwei gleichzeitig auf dieselbe Netzhautstelle fallende Strahlungen erzeugen, wenn sie einem und demselben oder zwei benachbarten Hauptabschnitten (vgl. S. 274) des Spektrums entnommen sind, durch ihr Zusammenwirken einen Farbenton, welcher auch durch eine einfache Strahlung erzeugt werden kann. Die Wellenlänge der

1) Der auf S. 21 definierte Begriff des Sehfeldelementes deckt sich nicht mit dem Begriffe des histologischen Elementes im Sehepithel.

letzteren liegt zwischen den Wellenlängen der beiden zur Mischung verwendeten Strahlungen und zwar je nach deren Mischungsverhältnis bald näher der einen, bald näher der anderen Wellenlänge. Solche aus zwei einfachen Strahlungen zusammengesetzte Strahlungen lassen sich als zweifache oder als binäre Strahlgemische bezeichnen. Wie man dieselben herzustellen vermag, wird später auseinandergesetzt. Es gilt dabei, den Gang der beiden Strahlungen so zu leiten, daß jede von beiden ein Außenfeld, d. i. das Mischfeld, ganz gleichmäßig erleuchtet, und daher an jedem Punkte des Feldes das Mischungsverhältnis das gleiche ist.

Zwar lehrt schon die bloße Betrachtung des Mischfeldes, daß dessen Farbenton im Spektrum zwischen den Farbentönen der beiden Einzelstrahlungen liegt, doch ist zur genaueren Feststellung erforderlich, neben dem Gemische zugleich die einfache Strahlung gleichen Farbentones sichtbar zu machen. Zu diesem Zwecke beleuchtet man nur die eine Hälfte des durch die Irisblende passend eingeengten Gesichtsfeldes des S. 280 erwähnten kleinen Fernrohres mit dem Strahlgemisch, die andere mit der zunächst nach Gutdünken gewählten einfachen Strahlung und regelt die Intensität der letzteren oder die des Gemisches so, daß beide Hälften beiläufig gleichhell erscheinen. Dabei wird, wenn man nicht zufällig schon die richtige einfache Strahlung gewählt hatte, der Farbenton beider Hälften verschieden sein. Man ändert nun in der, dieser Verschiedenheit entsprechenden Richtung die Wellenlänge der einfachen Strahlung, wonach sich jedoch wieder ein jetzt kleinerer Helligkeitsunterschied zeigen kann. Dieser wird abermals beseitigt, ev. die Wellenlänge der einfachen Strahlung nochmals berichtigt usw. Aber nur in besonderen, im folgenden näher zu besprechenden Fällen gelingt es, die Farben beider Hälften einander so weit gleich zu machen, daß sie weder im Farbentone noch im Freiheitsgrade noch in der Helligkeit eine merkliche Verschiedenheit zeigen, und auch dann ist nicht ausgeschlossen, daß bei gesteigerter Unterschiedsempfindlichkeit eine Ungleichheit doch noch bemerkbar sein würde. Insbesondere hat man sich zu hüten, das kleine Feld länger als 2—3 Sekunden zu fixieren, weil dann ein Unterschied, der bei gehöriger Aufmerksamkeit und Übung beim ersten Blick noch ganz leicht bemerkbar gewesen wäre, infolge örtlicher Anpassung der betroffenen Sehfeldstellen schon nach wenigen Sekunden völlig verschwunden sein kann.

Die Gleichheit des Farbentones, auf die es uns hier allein ankommt, ist sehr schwer festzustellen, wenn die beiden Farben in anderer Beziehung verschieden sind, sei es, daß die eine heller oder daß sie minder frei, d. h. merklicher mit Weiß, Grau oder Schwarz verhüllt erscheint (vgl. S. 52). Solche bei gleichem Farbentone merkliche Helligkeits- und Verhüllungsverschiedenheiten lassen sich selbst bei sorgfältigstem Verfahren besonders dann nicht ausschließen, wenn die beiden Strahlungen des Gemisches nicht

demselben, sondern zwei benachbarten Hauptabschnitten des Spektrums angehören, um so weniger, je größer der Unterschied ihrer Wellenlängen ist.

Für die Fälle nun, in welchen es möglich wird, zwischen dem binären Gemisch und der einfachen Strahlung eine wenigstens scheinbar tadellose Gleichheit der Farbe herzustellen, d. h. eine sogenannte Farbengleichung und nicht eine bloße Gleichheit des Farbentones zu erzielen, gilt die weitere sehr wichtige Regel, daß, wenn man bei gleichbleibendem Adaptationszustand des Auges die Intensität sämtlicher drei zur Herstellung der Farbengleichung benutzten Strahlungen in demselben Verhältnis steigert oder mindert, beide Hälften des Farbenfeldes ihre Helligkeit, ihre Freiheit und ev. auch ihren Farbenton in ganz gleicher Weise ändern, so daß immer eine Farbengleichung fortbesteht. Ebenso wie die einfache Strahlung bei Änderung ihrer Intensität für unser Auge ihren Farbenton ändern kann, gilt dies auch für den Ton eines binären Strahlgemisches.

Man erreicht die gemeinsame Intensitätsänderung aller drei Strahlungen an dem auf S. 280 beschriebenen Mischapparate in der einfachsten Weise dadurch, daß man den »Querspalt« weiter oder enger macht oder auch in minder bequemer Weise mit Hilfe eines in der Nähe des Querspaltes angebrachten Episkotisters.

Daß ein Gemisch aus zwei demselben Hauptabschnitte des Spektrums entnommenen Strahlungen denselben Farbenton zeigen kann, wie eine einfache im Spektrum zwischen diesen Strahlungen gelegene, und daß bei gemeinsamen Intensitätsänderungen aller drei Strahlungen die Gleichung zwischen der Farbe des Gemisches und der einfachen Strahlung fortbesteht, erklärt sich einfach durch die Annahme, daß *jede der beiden chromatischen Urvalenzen des Gemisches die Summe der gleichnamigen Urvalenzen der beiden einfachen Strahlungen des Gemisches ist.* Dann versteht sich ohne weiteres, daß die chromatische Wirkung auf die Sehsubstanz seitens des Strahlgemisches dieselbe ist, wie seitens der einfachen Strahlung. Ist dann auch die Summe der Weißvalenzen der beiden Strahlungen des Gemisches nicht merklich verschieden von der Weißvalenz der einfachen Strahlung, so versteht sich ferner, daß die Wirkung auf die Sehsubstanz nicht bloß in chromatischer, sondern in jeder Beziehung beiderseits gleich oder wenigstens so angenähert gleich ist, daß der etwa noch bestehende Unterschied unter der Schwelle der Merklichkeit bleibt. Eine solche für das helladaptierte Auge hergestellte Farbengleichung kann, weil sie eigentlich nur eine Farbentongleichung ist, zu einer Ungleichung werden, wenn an die Stelle des bestandenen Adaptationszustandes ein anderer tritt; denn ihr Fortbestehen würde zur Voraussetzung haben, daß die Empfindlichkeit des Auges gegenüber den Weißvalenzen aller drei benutzten Strahlungen sich mit dem Grade der Adaptation in demselben Verhältnis ändert, wie gegenüber den chromatischen Valenzen. Dies ist jedoch, wie später zu

erörtern sein wird, nicht der Fall. Zunächst beschäftigen uns hier nur die chromatischen Valenzen.

Über die Intensitäten, d. h. die Energiewerte der drei bei Herstellung solcher Farbengleichungen verwendeten Strahlungen sagt uns die Gleichung nichts aus. Wir erfahren also auch nichts darüber, wie sich der Energiewert der einfachen Strahlung zu dem des ihr gleichscheinenden Gemisches verhält. Nur über die Verhältnisse der chromatischen Valenzen gibt uns die Gleichung gewisse Aufschlüsse. Es wäre freilich sowohl in theoretischer als in praktischer Hinsicht von großer Wichtigkeit, wenn wir jede der drei zur Gleichung benutzten Strahlungen nicht nur durch ihre Wellenlänge, sondern auch durch ihren Energiewert kennzeichnen könnten. Solange uns aber bei unseren Untersuchungen über die Beziehungen zwischen den physikalischen Eigenschaften des Lichtes und seinen psychischen Wirkungen keine zureichend bequeme und sichere Methode zur Messung des Energiewertes einer Strahlung zur Verfügung steht, begnügen wir uns, die einzelne Strahlung außer durch ihre Wellenlänge durch die Spaltbreite zu kennzeichnen, bei welcher die Strahlung verwendet wird. Dabei ist immer vorausgesetzt, daß die Lichtquelle, durch deren spektrale Auflösung wir die einzelnen Strahlungen gewinnen, in quantitativer uud qualitativer Beziehung bei jedem Einzelversuche wieder die gleiche ist.

Mischung zweier dem rot-gelben Spektralabschnitt entnommenen Strahlungen. Um die Ergebnisse der Mischung zweier demselben Hauptabschnitte angehöriger Strahlungen an einem Beispiele zu erläutern, wollen wir eine Strahlung, deren mittlere Wellenlänge gleich der Wellenlänge der Linie *C* (656 $\mu\mu$) ist, mit einer Strahlung mischen, deren Wellenlänge gleich derjenigen der Natriumlinie *D* (589 $\mu\mu$) ist, die ich kurz als *C*-Strahlung und als *D*-Strahlung bezeichnen will. Da beide dem rot-gelben Abschnitte des Spektrums angehören, so hat jede von beiden eine rote und eine gelbe Urvalenz. Die einfache Strahlung, welche bei einem bestimmten Intensitätsverhältnis der beiden Strahlungen des Gemisches denselben Farbenton wie dieses zeigt, habe die Wellenlänge 600 $\mu\mu$ und diejenige Intensität, bei welcher beide Feldhälften einander gleich erscheinen. Aus dieser Gleichung folgt, daß die Summe der beiden Gelbvalenzen der Einzelstrahlungen gleich ist der Gelbvalenz der einfachen Strahlung von der Wellenlänge 600 $\mu\mu$ und ebenso die Summe der beiden Rotvalenzen der gemischten Strahlungen gleich der Rotvalenz der einfachen. Angenommen, diese Gleichung wäre hergestellt und man vertauscht nun die einfache Strahlung mit einer solchen von größerer Wellenlänge, so erscheint dann das entsprechende Halbfeld rötlicher als das vom Gemische bestrahlte. Jetzt genügt eine bloße Intensitätsminderung der *D*-Strahlung bei ganz unveränderter *C*-Strahlung, um dem Strahlgemisch denselben Farbenton zu geben, den die einfache Strahlung zeigt, und bei passend gewählter Inten-

sität der letzteren besteht wieder eine gute Gleichung. Ebenso läßt sich für alle übrigen zwischen 600 $\mu\mu$ und 656 $\mu\mu$ liegenden Strahlungen durch alleinige Verminderung der *D*-Strahlung eine gute Gleichung zwischen dem Strahlgemisch und dem einfachen Lichte herstellen. Umgekehrt kann man durch alleinige Minderung der *C*-Strahlung bei ungeänderter *D*-Strahlung dem Strahlgemische dieselbe Farbe geben, in welcher irgend eine zwischen den Wellenlängen 600 und 589 $\mu\mu$ liegende Strahlung bei passender Intensität erscheint[1]).

Jede von allen auf diese Weise hergestellten Gleichungen sagt in betreff der chromatischen Valenzen zwar aus, daß die Summe der Rotvalenzwerte der beiden gemischten Strahlungen gleichgroß ist wie der Rotvalenzwert der einfachen Strahlung und ebenso, daß die Summe der Gelbvalenzwerte der gemischten Strahlungen gleich dem Gelbvalenzwerte der einfachen; sie sagt jedoch nichts aus über die Einzelwerte der Rot- und der Gelbvalenzen in den drei Strahlungen. Die Gleichung lehrt nur, daß die beiden Rotvalenzwerte der Strahlungen des Gemisches in bezug auf den Rotvalenzwert der einfachen Strahlung sozusagen komplementär sind, d. h. daß sie sich untereinander zu dem Rotvalenzwerte der einfachen Strahlung ergänzen, und daß von den Gelbvalenzwerten dasselbe gilt.

Mischung zweier einfacher Strahlungen, welche zwei verschiedenen, aber aneinandergrenzenden Hauptabschnitten des Spektrums entnommen sind. Für die Fälle, in denen die beiden Strahlungen des Gemisches zwei verschiedenen aneinandergrenzenden Hauptabschnitten angehören und also im Spektrum eine urfarbig wirkende Strahlung zwischen sich haben, mögen als erstes Beispiel die Gemische dienen, die sich aus der Strahlung von der mittlen Wellenlänge 671 $\mu\mu$, das ist die Wellenlänge der roten Lithiumlinie, und aus einer Strahlung von der mittlen Wellenlänge 535 $\mu\mu$, das ist die Wellenlänge der gelbgrünen Thalliumlinie, herstellen lassen. Letztere Strahlung möge kurz als *Tl*-Strahlung, erstere als *Li*-Strahlung bezeichnet werden.

Aus diesen beiden Strahlungen läßt sich ein Gemisch bilden, das dem helladaptierten Auge weder grünlich noch rötlich, sondern rein gelb erscheint. Lassen wir dann die Intensität der *Li*-Strahlung unverändert, mindern aber die Intensität der *Tl*-Strahlung, so wird die Farbe des Gemisches rötlich und geht mit zunehmender Minderung der *Tl*-Strahlung durch Orange hindurch schließlich in Rot über. Lassen wir dagegen die

---

1) Diese Art von Änderung des Mischungsverhältnisses zweier Strahlungen ist an dem von HELMHOLTZ angegebenen Apparate für spektrale Farbenmischung nicht möglich, weil bei diesem beide Strahlungen des Gemisches aus demselben Kollimator stammen, der nur einen Spalt besitzt, durch dessen Verbreiterung die Intensität beider Strahlungen zugleich gesteigert wird. Es läßt sich also zwar jedes beliebige Mischungsverhältnis zweier Strahlungen herstellen, nicht aber die eine unabhängig von der anderen verstärken oder schwächen.

Tl-Strahlung unverändert, mindern aber mehr und mehr die *Li*-Strahlung, so wird das Gelb zunehmend grünlicher. Allen auf die eine oder andere Weise erzeugten Farben ist also eine mehr oder weniger deutliche Gilbe gemeinsam, während ihr zweiter bunter Bestandteil sich in einem Teil der Gemische durch eine mehr oder weniger deutliche Röte, im anderen durch eine mehr oder weniger deutliche Grüne kennzeichnet.

Während den Farben sämtlicher Gemische, deren beide Strahlungen aus demselben rot-gelben Abschnitte des Spektrums entnommen waren, eine mehr oder weniger deutliche Röte ebenso gemeinsam war, wie eine mehr oder weniger deutliche Gilbe, zeigen also die Farben der aus der *Li*- und der *Tl*-Strahlung erzeugten Gemische zwar sämtlich eine gewisse Gilbe, ihr zweiter bunter Bestandteil kann aber je nach dem Überwiegen der einen oder der anderen Strahlung ein ganz verschiedener sein. Zur Beobachtung des Gesagten genügt auch hier schon die alleinige Betrachtung des Mischfeldes bei beliebiger Größe desselben, doch ist zur genaueren Untersuchung wieder erforderlich, neben jedem Gemische die einfache Strahlung sichtbar zu machen, deren Farbenton dem des Gemisches gleich ist, und womöglich wieder eine gute Farbengleichung herzustellen. Dies ist auch bei diesen Gemischen möglich, wenn das Farbenfeld klein und das Auge im Zustande einer guten Helladaptation ist. Hat jedoch infolge der Verfinsterung des übrigen Gesichtsfeldes die Helladaptation bereits wieder erheblich nachgelassen oder war sie schon anfangs ungewöhnlich gering, besteht also, anders gesagt, eine merkliche Dunkeladaptation, so erscheint das Gemisch in vielen Fällen weißlicher als die einfache Strahlung. Dies erschwert die Feststellung der Gleichheit des Farbentones und mahnt daran, die anfängliche Helladaptation wieder herzustellen. Ist das Auge genügend hell adaptiert, so kann man auch bei diesen Gleichungen wieder durch Änderung des Querspaltes alle drei zur Gleichung benutzten Strahlungen in gleichem Verhältnis vergrößern oder verkleinern, ohne daß eine Ungleichheit des Farbentones oder der Verhüllung beider Feldhälften bemerklich ist.

Bei allen eben erwähnten Gleichungen addiert sich wieder die Gelbvalenz der *Tl*-Strahlung zur Gelbvalenz der *Li*-Strahlung und die Summe ist wieder gleich der Gelbvalenz der einfachen Strahlung. Anders verhält es sich mit der Rotvalenz der einen und der Grünvalenz der anderen Strahlung des Gemisches. Bei einem einzigen ganz bestimmten Mischungsverhältnis erscheint das Gemisch rein gelb und hat also weder Rot- noch Grünvalenz, sondern nur die summarische Gelbvalenz. Die Rot- und Grünvalenz sind also zwei gleichgroßen antagonistischen Kräften zu vergleichen, aus denen sich für die Sehsubstanz keine Resultierende ergibt. Ihre Einzelwirkungen heben sich bei ihrem Zusammentreffen gegenseitig auf. Bei jedem anderen Mischungsverhältnis ist entweder die Rotvalenz der *Li*-Strahlung größer als die Grünvalenz der *Tl*-Strahlung, oder das Umgekehrte

findet statt. Dann vermag die jeweils kleinere Urvalenz einen ihr selbst gleichgroßen Teil der anderen aufzuheben und nur der jeweilige Rest der letzteren bleibt als Rot- oder Grünvalenz des Strahlgemisches übrig. Das Größenverhältnis dieses Restes zur summarischen Gelbvalenz des Gemisches bestimmt die Qualität der chromatischen Valenz des letzteren, und diejenige einfache Strahlung, in welcher dieses Größenverhältnis dasselbe ist, zeigt denselben Farbenton wie das Gemisch.

Geben wir der jeweils größeren von den beiden antagonistischen Urvalenzen das +, der kleineren das — Zeichen, so können wir den bleibenden Rest der größeren als die algebraische Summe der beiden Urvalenzen bezeichnen und das Ergebnis sämtlicher Mischungsversuche mit der *Li*- und der *Tl*-Strahlung dahin zusammenfassen, daß sowohl die Gelbvalenzen beider Strahlungen als die Rotvalenz der einen und die Grünvalenz der anderen sich algebraisch summieren.

In § 13 wurde dargelegt, daß es keine bunte Gesichtsempfindung (Sehqualität) gibt, welche zugleich einen gelben und einen blauen oder zugleich einen roten und einen grünen Bestandteil zeigt. Dies besagt zugleich, daß es auch keine einfache oder mehrfache Strahlung gibt, welche zugleich eine gelbe und eine blaue Valenz oder, was für die eben besprochenen Strahlgemische in Betracht kommt, zugleich eine Rot- und eine Grünvalenz hat. Für die einfachen Strahlungen liegt es schon im Begriffe der Valenz, da die Art der urfarbigen Bestandteile der von einer einfachen Strahlung bewirkten Farbe das Bestimmende für die Art der urfarbigen Teilvalenzen ist, welche wir der Strahlung zuschreiben. Für die zweifachen Strahlgemische versteht es sich nunmehr auch, denn wenn gegenfarbige Urvalenzen sich bei der Mischung gegenseitig ganz oder teilweise aufheben und nur der nicht neutralisierte Rest der größeren auf die Sehsubstanz wirkt, so kann das Strahlgemisch nie zwei gegenfarbige Urvalenzen zugleich enthalten. Aus unserer Analyse der bunten Farben als Sehqualitäten ergab sich nur die Erfahrungstatsache, daß Rot und Grün sich gegenseitig ausschließen, und nur deshalb konnten sie dort als Gegenfarben bezeichnet werden. Die soeben beschriebenen Mischungsversuche haben uns nun gezeigt, daß sie sich deshalb ausschließen, weil sie sich in ihren Wirkungen auf die Sehsubstanz gegenseitig aufheben. Ihre Bezeichnung als Gegenfarben wird hierdurch vollends gerechtfertigt.

§ 65. Die Sehsubstanz. Die Valenzen als auf das Sehorgan wirkende Kräfte. Setzen wir wieder den Fall, die Sehsubstanz befinde sich in chromatisch neutraler Stimmung und das in einem Sehwinkel von etwa 4° erscheinende Kreisfeld des kleinen Fernrohrs unseres Spektroskopes sei mit einer Strahlung gleichmäßig beleuchtet, die einem der drei Kardinalpunkte des Spektrums, z. B. dem Urgelb (575 $\mu\mu$) entspricht. Fixieren

wir einige Zeit, z. B. 20 Sekunden lang, den Mittelpunkt des leuchtenden Feldes, und setzen dann die Stärke der Strahlung durch Verengerung des Querspaltes mit mäßiger Geschwindigkeit mehr und mehr herab, so verbleicht gleichzeitig zusehends das Gelb, wird immer weißlicher und hierauf tonfrei weiß. Aber nur einen Augenblick besteht diese tonfreie Farbe, dann wird das Kreisfeld bläulich, und während die tonfreie Komponente der Empfindung mehr und mehr zurücktritt, wird das Blau freier und schöner.

Stellt man denselben Versuch mit der dem urblauen Kardinalpunkte entsprechenden Strahlung an, so erscheint das Kreisfeld zuerst in einem stark mit Weiß verhüllten Blau, verliert dann während der Abschwächung der Strahlstärke mehr und mehr an Bläue, wird tonfrei und hierauf immer deutlicher gelb oder braun.

Macht man drittens den Versuch mit der urgrün wirkenden Strahlung des Spektrums, so sieht man zunächst ein helles weißliches Grün, das bei Verminderung der Strahlstärke sich zunehmend verhüllt, vorübergehend tonfrei wird und dann in weißliches Rot umschlägt.

Bei diesen Versuchen wird also, nachdem die bezügliche Strahlung einige Zeit mit unverminderter Stärke auf die betroffene Netzhautstelle gewirkt hat, die anfängliche urfarbige Empfindung durch bloße Minderung der Strahlstärke in eine tonfreie und sodann gegenfarbige Empfindung verwandelt. Die bunte urfarbige Komponente der anfänglichen Empfindung tritt gegenüber der tonfreien immer mehr zurück, verschwindet dann ganz und die gegenfarbige Komponente tritt mit wachsender Deutlichkeit hervor. Übrigens bemerkt ein aufmerksamer Beobachter schon bevor die Strahlstärke vermindert wird, ein Zurücktreten der bunten Empfindungskomponente gegenüber der tonfreien.

Währt die Fixierung der Mitte des von der einfachen Strahlung beleuchteten Kreisfeldes länger als wie ich dies beispielsweise angenommen habe, so genügt eine kleinere Minderung der Strahlstärke, um die gelbe bzw. grüne oder blaue Urfarbe verschwinden und in ihre Gegenfarbe umschlagen zu sehen; ist dagegen die Fixierungsdauer kürzer, so erfolgt der Umschlag erst bei einer größeren Minderung der Strahlstärke. Längere Dauer des Fixierens wirkt also in demselben Sinne wie größere Minderung der Strahlstärke. (Auf individuelle Verschiedenheiten sowie die jeweilige Disposition des Beobachters wird später zurückzukommen sein.)

Die in weiten Kreisen der Physiker und Physiologen eingebürgerte Ansicht, nach welcher für den farbentüchtigen Netzhautbezirk eines normalen Auges mindestens zwei (sogenannte komplementäre) einfache Strahlungen eines Spektrums von nicht allzu großer Helligkeit[1]) zur Erzeugung

1) Daß bei sehr hohen Strahlstärken fast alle einfachen Strahlungen mit Ausnahme der langwelligsten weiß erscheinen können, ist längst bekannt.

der weißen Empfindung nötig sind, trifft also hier nicht zu; vielmehr vermag man auch mit nur einer einfachen Strahlung eine tonfreie Weißempfindung in der beschriebenen Weise, wenngleich nur vorübergehend, herbeizuführen, und dies gilt von allen einfachen Strahlungen des Spektrums.

Man könnte sich versucht fühlen, die beschriebenen Tatsachen irgendwie aus einer mit der Dauer der Bestrahlung zunehmenden Ermüdung für den Reiz der Strahlung erklären zu wollen. Aber eine derartige Auffassung scheitert sofort daran, daß man auf jeder durch die Minderung der Strahlstärke herbeigeführten Stufe der Farbenänderung die ursprünglich gesehene bunte Farbe sofort wiederherstellen kann, wenn man die Strahlstärke wieder auf ihre anfängliche Höhe bringt. Es genügt, in dem Augenblicke, wo das fixierte Kreisfeld eben weiß oder bereits in der Gegenfarbe erscheint, dem Querspalte, von dessen Breite die Stärke der auf das Auge wirkenden Strahlung abhängt, rasch wieder die ursprüngliche Breite zu geben, um sofort auf dem Kreisfelde den anfangs gesehenen Farbenton in nahezu unverändertem Freiheitsgrade wieder erscheinen zu lassen. Dabei wirkt die Strahlung nicht nur fort, sondern wird während des Wiederansteigens ihrer Stärke auf die anfängliche Höhe sogar gesteigert; die vermeintliche Ermüdung müßte dabei noch weiter zunehmen und der bereits unkenntlich gewordene Farbenton müßte nun erst recht unter die Schwelle der Wahrnehmung sinken.

Auf die gleichzeitig mit den Farbenänderungen des Kreisfeldes eintretenden Änderungen des ganzen übrigen Sehfeldes wird später zurückzukommen sein. Hier handelt es sich insbesondere darum, daß während der noch andauernden, wenngleich geminderten Bestrahlung des Kreisfeldes die Gegenfarbe der anfangs gesehenen Farbe mit voller Entschiedenheit erscheint.

Die optische Valenz einer Strahlung läßt sich als eine auf das innere Auge wirkende Kraft betrachten. Wenn wir nun bei unserem Versuche sehen, daß das einige Zeit mit der urgelb wirkenden Strahlung beleuchtet gewesene Kreisfeld bei Abschwächung der Strahlstärke sofort seine Gilbe verliert und tonfrei weiß werden kann, so können wir sagen, daß die vorhergegangene gelbwirkende Beleuchtung in dem bestrahlten Gebiete des somatischen Sehfeldes eine der Gelbvalenz der Strahlung entgegenwirkende Kraft wachgerufen hat, durch welche die gelbwirkende Kraft aufgehoben oder neutralisiert wird; und wenn wir bei noch weitergehender Abschwächung der Strahlung das Kreisfeld blau werden sehen, können wir sagen, daß die in der lebendigen Substanz des bestrahlten Gebietes geweckte Gegenkraft jetzt ein Übergewicht über die gelbwirkende Kraft der Strahlung gewonnen hat und daß sie eine blauwirkende ist. Je länger die Bestrahlung dauert, desto weiter entwickelt sich diese antagonistische Kraft

und eine desto kleinere Minderung der Strahlstärke genügt zur Herstellung eines Gleichgewichtes zwischen den beiden Kräften bzw. zu einem Überwiegen der blauwirkenden Gegenkraft.

Diese Auffassung der optischen Valenz als einer auf das Sehorgan wirkenden allonomen Kraft, auf welche dieselbe mit einer autonomen Gegenkraft reagiert, gibt zwar keine Erklärung der beschriebenen Tatsachen, ist aber, wie sich weiterhin zeigen wird, in mannigfacher Beziehung sehr zutreffend.

Auch andere Erscheinungen legen uns die Auffassung der Strahlungen als auf das Sehorgan wirkender Kräfte nahe.

Der Mannigfaltigkeit der Farbentöne entspricht die Mannigfaltigkeit der geraden Linien, die auf einer Ebene von einem Punkte derselben ausgehen können. Denkt man sich diesen Punkt als Mittelpunkt des auf Tafel I dargestellten Farbenkreises, so gehört jeder Radius zu einem bestimmten Farbentone des Kreises und kann als Vertreter dieses Farbentones gelten. Wie man auf dem Kompaß vier Hauptrichtungen unterscheidet, so lassen sich auch hier vier Radien als Hauptradien und alle übrigen als Zwischenradien bezeichnen. Den vier Hauptradien entsprechen die vier bunten Urfarben; der urrote Hauptradius liegt dem urgrünen, der urgelbe dem urblauen diametral gegenüber, und dasselbe gilt überhaupt von je zwei gegenfarbigen Zwischenradien.

Da bei chromatisch neutral gestimmtem Auge jede optisch wirkende einfache Strahlung einen bestimmten Farbenton erzeugt und wir ihr deshalb eine qualitativ bestimmte optische Valenz zuschreiben können, so läßt sich, abgesehen von den Purpurtönen, jeder Radius auch als Vertreter einer solchen Valenz betrachten, und was soeben von den Farben der Haupt- und Zwischenradien gesagt wurde, gilt dann ebenso von den bunten Valenzen der einfachen Strahlungen.

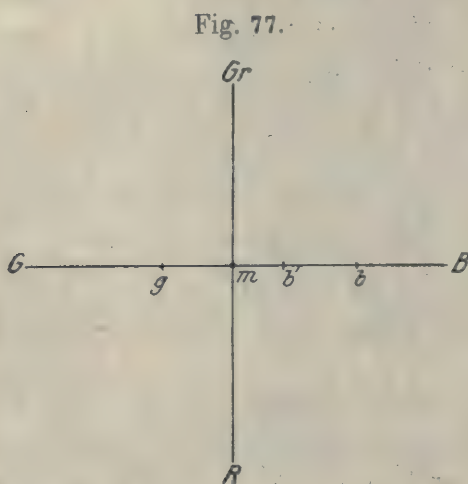
Erwägen wir endlich, daß jede Strahlung sich als eine auf das Sehorgan wirkende allonome Kraft ansehen läßt, auf welche die lebendige Substanz desselben mit der Entwicklung einer autonomen Kraft antwortet, so kann jeder Radius auch als Symbol der Richtung angesehen werden, in welcher eine dieser Kräfte wirkt, und der Mittelpunkt als Angriffspunkt derselben. Einer aus diesem Punkte auf dem Radius abgetragenen Strecke entspricht dann die Größe der optischen Valenz oder Kraft.

Die geschilderten Versuche haben wieder sehr anschaulich gemacht, daß die Farbe nicht eine Eigenschaft der Strahlung ist und von der letzteren dem Sehorgan nur mitgebracht wird, sondern daß sie auf einer Reaktion des Sehorgans beruht und das psychische Korrelat einer von der Strahlung in der Sehsubstanz bewirkten physischen Änderung ist. Ich kann deshalb, ohne ein Mißverständnis befürchten zu müssen, statt von einer gelb-, blau- usw. wirkenden Kraft kurz von einer Blaukraft, Gelbkraft usw.

sprechen, wie ich bereits von einer Gelbvalenz, Blauvalenz usw. gesprochen habe.

Wenn also z. B. die dem gelben Kardinalpunkte des Spektrums entsprechende Strahlung auf die chromatisch neutral gestimmte Sehsubstanz wirkt, so kann ich sagen, es wirke jetzt auf letztere eine allonome Urgelbkraft, und die bei Wirkung derselben sich entwickelnde Gegenkraft kann ich als autonome Urblaukraft bezeichnen. Wirken beiderlei Kräfte gleichzeitig auf die Sehsubstanz, so heben sie sich, wenn sie im besonderen Falle gleichgroß sind, als diametral entgegengesetzte Kräfte in ihrer optischen Wirkung vollständig auf; wenn sie aber von verschiedener Größe sind, so bleibt nur die Differenz beider Größen im Sinne der größeren Kraft wirksam.

Fig. 77.



Hätten wir also auf dem urgelben Radius eine der Größe der allonomen Urgelbkraft entsprechende Strecke abgetragen und wäre die entstandene Urblaukraft die kleinere von beiden, so hätten wir jetzt diese Strecke um den entsprechenden Betrag zu kürzen; falls aber die Urblaukraft die größere wäre, diese auf der dem blauen Radius entsprechenden Strecke um den Betrag der allonomen Urgelbkraft zu kürzen. Letzteren Fall versinnlicht Fig. 77, in der mg die Größe der zu einem bestimmten Zeitpunkte bestehenden allonomen Urgelbkraft, mb die Größe der zu demselben Zeitpunkte bestehenden autonomen Urblaukraft und mb_1 den durch die allonome Kraft nicht neutralisierten und daher wirksam gebliebenen Rest der autonomen Kraft bedeutet ($mb - mg = mb_1$).

Druck von Breitkopf & Härtel in Leipzig.